

Universidad Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica



INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

# ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS EN CARRETERA

AUTOR: CARLOS LOBATO SANTOS

TUTOR: JOSÉ LUIS SAN ROMÁN GARCÍA

Leganés, diciembre de 2012





# Resumen

Este proyecto tiene como objetivo fundamental la evaluación de la viabilidad técnica y económica de realizar una inversión en infraestructuras nuevas para poder automatizar la conducción de vehículos pesados siguiendo patrones ferroviarios. Con esto se busca una separación del tráfico de vehículos ligeros y pesados mejorando considerablemente la seguridad y fluidez de la circulación por carretera. Se ha realizado el estudio económico de la inversión necesaria para construir una vía de doscientos treinta kilómetros de longitud. Debido a que las inversiones en infraestructuras suponen un gran esfuerzo económico hay que analizar el coste social que esto supone y el impulso económico que puede generar, ya que, además de disminuir la probabilidad de ocurrencia de un accidente, aumentaría la eficiencia del transporte debido a la implementación de nuevas tecnologías que permitan la conducción automática de los vehículos. De esta forma se conseguirá un gran aumento de la competitividad de las empresas de transporte y productoras. Para ello se realiza un análisis de la situación actual de la tecnología necesaria para acometer el proyecto, recopilando la información disponible de las investigaciones que están llevando a cabo las compañías y universidades sobre esta materia.

**Palabras clave** Viabilidad técnica y análisis coste beneficio de la construcción de calzadas independientes para el tráfico de mercancías por carretera y automatización de la conducción siguiendo patrones ferroviarios



# Abstract

This Project is focused on the evaluation of the economic and technical viability of an infrastructure's investment which target is the automation of heavy vehicles using rail patterns. The purpose is to split the traffic, so the new road will be designed only for the circulation of heavy vehicles. Therefore, the security and traffic flow will be increased considerably. Due to the infrastructures investments will take a lot of effort, it is necessary to analyze the social cost and the possible improvement of the economy that the project could generate. The vehicle automation decreases the probability of occurrence of an accident and increases transport efficiency, so the companies will be more competitive. It is necessary to analyze the current situation of the technology required to make this project reality, collecting all the information available about the investments carried out by companies and universities in this field.

**Keywords:** Technical feasibility and cost benefit analysis of the construction of road ways independent freight traffic by road and driving automation following rail patterns.



# Índice general

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
Introducción .....	2
Objetivos .....	3
Fases del desarrollo .....	3
Estructura de la memoria .....	4
<b>CAPÍTULO 2: INGENIERÍA DE TRÁFICO .....</b>	<b>5</b>
2.1 Introducción .....	6
2.2 Variables fundamentales de la ingeniería del tráfico .....	7
2.2.1 Intensidad .....	7
2.2.2 Ciclos de intensidad de tráfico .....	8
2.2.2.1 Ciclo anual de la intensidad .....	8
2.2.2.2 Ciclo semanal de la intensidad .....	9
2.2.2.3 Distribución de frecuencias de intensidades horarias .....	9
2.2.3 Factor de Hora Punta (FHP) .....	10
2.2.4 Composición del tráfico .....	10
2.2.5 Velocidad .....	11
2.2.6 Densidad .....	13
2.3 Ecuación fundamental del tráfico .....	16
2.3.1 Relación entre densidad por carril y velocidad media .....	17
2.3.2 Relación entre intensidad y densidad .....	18
2.3.3 Relación entre velocidad e intensidad .....	19
2.4 Capacidad y Niveles de servicio .....	20
2.4.1 Definición de capacidad .....	20
2.4.2 Definición de niveles de servicio e intensidad de servicio .....	21
2.4.3 Niveles de servicio en circulación continua .....	22
2.4.4 Niveles de servicio y capacidad (I/C) en autopistas .....	26
2.4.5 Niveles de servicio y capacidad en autovías y carreteras de calzada única con cuatro o más carriles .....	29
2.5 MODELOS DE TRÁFICO .....	31
2.5.1 Modelos macroscópicos .....	31
2.5.1.1 Modelos que relacionan la velocidad y la densidad .....	31
2.5.1.2 Modelos que relacionan la intensidad y la densidad .....	33
2.5.1.3 Modelos que relacionan la velocidad y la intensidad .....	34
2.5.2 Modelos microscópicos .....	35
2.5.3 Modelos mesoscópicos .....	37
<b>CAPÍTULO 3: ESTUDIO DEL ESTADO DE LA TÉCNICA .....</b>	<b>38</b>
3.1 Introducción .....	39
3.2 Estado de la técnica .....	42

3.3 Descripción del sistema .....	50
3.4 Conclusión .....	54
<b>CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA .....</b>	<b>55</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	56
4.2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN .....	59
4.2.1 Valor Actual Neto (VAN) .....	59
4.2.2 Relación entre el VAN social y el VAN financiero .....	62
4.2.3 Flujo de beneficios y costes en el VAN .....	62
4.2.4 Medición de beneficios y costes .....	64
4.2.4.1 Fundamentos de la medición de beneficios y costes sociales .....	64
4.2.4.2 Medición de beneficios sociales. Caso general .....	71
4.2.4.3 Análisis de demanda y costes con y sin proyecto .....	73
4.3 INCERTIDUMBRE Y CRITERIOS DE DECISIÓN .....	78
4.3.1 La incertidumbre en los proyectos de transporte .....	78
4.3.2 La modelización de la incertidumbre .....	80
4.3.3 Criterios de decisión bajo incertidumbre .....	81
4.3.4 La decisión de retrasar un proyecto .....	86
4.4 COMPLETANDO EL MODELO BÁSICO .....	87
4.4.1 Limitaciones del modelo básico .....	87
4.4.2 Precios sombra .....	87
4.4.3 Tasa social de descuento .....	88
4.4.4 Medición monetaria: coste de los accidentes e impactos ambientales ....	89
4.4.5 Efectos indirectos del proyecto .....	91
4.4.6 Incentivos y contratos .....	93
4.4.7 Beneficios y beneficiarios .....	95
4.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA DEL PROYECTO .....	96
4.5.1 Consideraciones .....	98
4.5.2 Cómputo de beneficios y costes sociales y privados .....	101
4.5.3 Incertidumbre: Definición de variables aleatorias. ....	111
4.5.3.1 Demanda futura .....	111
4.5.3.2 Desviación del coste de construcción .....	119
4.5.3.3 Valor del tiempo .....	120
4.5.3.4 Probabilidad de que un vehículo realice la ruta en su totalidad .....	120
4.5.3.5 Cálculo y discusión del VAN social y financiero del proyecto .....	122
<b>CAPÍTULO 5: SIMULACIÓN DE TRÁFICO .....</b>	<b>128</b>
5.1 INTRODUCCIÓN .....	129
5.1.1 Geometría de estudio .....	129
5.2 MODELADO DEL TRÁFICO .....	131
5.2.1 Datos de demanda de tráfico .....	132
5.3 MODELOS AMBIENTALES .....	138
5.3.1 Modelo de Consumo de Combustible .....	138
5.3.1.1 Parámetros de entrada del modelo de consumo de combustible .....	140
5.3.1.2 Parámetros de salida del modelo de consumo de combustible .....	141
5.3.2 Modelo de Emisión de Contaminantes QUARTET .....	142
5.3.2.1 Parámetros de entrada del modelo QUARTET .....	142
5.3.2.2 Parámetros de salida del modelo QUARTET .....	145
5.4 DATOS DE LA DEMANDA .....	146
5.4.1 Escenario 0 .....	146
5.4.2 Escenario 1 .....	149
5.5 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN .....	150

5.5.1	Escenario 0 .....	152
5.5.1.1	Emisión de contaminante CO .....	154
5.5.1.2	Emisión de contaminante HO .....	155
5.5.1.3	Emisión de contaminante NOx .....	156
5.5.1.4	Consumo de combustible .....	157
5.5.1.5	Densidad .....	158
5.5.1.6	Distancia total recorrida .....	159
5.5.1.7	Tiempo de demora .....	160
5.5.1.8	Tiempo de viaje .....	161
5.5.1.9	Velocidad .....	162
5.5.2	Escenario 1 .....	163
5.5.2.1	Emisión de contaminante CO .....	164
5.5.2.2	Emisión de contaminante HO .....	165
5.5.2.3	Emisión de contaminante NOx .....	166
5.5.2.4	Consumo de combustible .....	167
5.5.2.5	Densidad .....	168
5.5.2.6	Distancia total recorrida .....	169
5.5.2.7	Tiempo de demora .....	170
5.5.2.8	Tiempo de viaje .....	171
5.5.2.9	Velocidad .....	172
5.5.3	Comparación de resultados y conclusiones .....	174
5.5.3.1	Comparación de distancia total recorrida .....	175
5.5.3.2	Comparación de velocidad .....	175
5.5.3.3	Comparación de emisión de contaminantes .....	175
5.5.3.4	Comparación de consumo de combustible .....	175
5.5.3.5	Comparación de densidad .....	176
5.5.3.6	Comparación de tiempo de demora y viaje .....	176
5.5.4	Semillas .....	177
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>		<b>178</b>
<b>GLOSARIO .....</b>		<b>182</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>183</b>
ANEXO 1: TABLAS OBTENIDAS EN LA SIMULACIÓN .....		185
ESCENARIO 0: ESTADO ACTUAL .....		186
ESCENARIO 1: SEPARACIÓN DEL TRÁFICO .....		190
COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN UTILIZANDO DIFERENTES SEMILLAS .....		194



# Índice de figuras

<i>Figura 1: Ciclo Intensidad Anual de Madrid. [Fuente UC3M]</i> .....	8
<i>Figura 2: Distribución horaria del tráfico medio [Ministerio de Fomento]</i> .....	9
<i>Figura 3: Tramo para medir la densidad de tráfico</i> .....	13
<i>Figura 4: Relación entre velocidad y densidad [UC3M]</i> .....	17
<i>Figura 5: Relación entre intensidad y densidad [UC3M]</i> .....	18
<i>Figura 6: Relación entre velocidad e intensidad</i> .....	19
<i>Figura 7: Nivel de servicio A</i> .....	22
<i>Figura 8: Nivel de servicio B</i> .....	23
<i>Figura 9: Nivel de servicio C</i> .....	23
<i>Figura 10: Nivel de servicio D</i> .....	24
<i>Figura 11: Nivel de servicio E</i> .....	24
<i>Figura 12: Nivel de servicio F</i> .....	25
<i>Figura 13: Relación velocidad-densidad obtenida mediante datos experimentales</i> .....	32
<i>Figura 14: Relación densidad-intensidad según el modelo de Greenshields</i> .....	33
<i>Figura 15: Configuración iCab</i> .....	43
<i>Figura 16: Autobús proyecto AUTOPIA [Proyecto AUTOPIA]</i> .....	44
<i>Figura 17: Automóvil proyecto AUTOPIA [Proyecto AUTOPIA]</i> .....	44
<i>Figura 18: Sistema de comunicación inalámbrica entre vehículos</i> .....	46
<i>Figura 19: Prototipos de vehículos autónomos de Google [Google]</i> .....	47
<i>Figura 20: Modelo LIDAR más utilizado e imagen generada [Velodyne]</i> .....	48
<i>Figura 21: Radares y cámara del parabrisas</i> .....	48
<i>Figura 22: Diagrama de bloques general de automatización de vehículos</i> .....	53
<i>Figura 23: Ilustración funcionamiento del sistema</i> .....	53
<i>Figura 24: Flujos de Beneficios y Costes típicos de un proyecto</i> .....	61
<i>Figura 25: Relación tipo entre VAN social y VAN privado</i> .....	61
<i>Figura 26: Beneficios sociales de un proyecto de transporte</i> .....	65
<i>Figura 27: Beneficios Sociales de un Proyecto con alternativas de transporte existentes.</i>	66
<i>Figura 28: Variación del precio generalizado</i> .....	68
<i>Figura 29: Beneficio social considerando externalidades negativas</i> .....	69
<i>Figura 30: Beneficio Social considerando externalidades y alternativas de transporte</i> ....	70
<i>Figura 31: Caso general de medición de Beneficios sociales</i> .....	71
<i>Figura 32: Beneficios iniciales del proyecto</i> .....	74
<i>Figura 33: Beneficios del proyecto y cambios en la demanda en el año <math>t+1</math></i> .....	75
<i>Figura 34: Beneficios del proyecto con cambios en los costes</i> .....	76
<i>Figura 35: Beneficios y cambios en los costes en el año <math>t+1</math></i> .....	77
<i>Figura 36: Distribuciones de probabilidad usuales</i> .....	81
<i>Figura 37: Función de distribución del VAN social. Caso 1</i> .....	82
<i>Figura 38: Aceptar condicionadamente el proyecto</i> .....	83
<i>Figura 39: Rechazar siempre el proyecto</i> .....	83



<i>Figura 40: Elección de un proyecto que es mejor que otro</i> .....	84
<i>Figura 41: Elección del proyecto en función del VAN financiero</i> .....	85
<i>Figura 42: Elección del proyecto en función del riesgo</i> .....	85
<i>Figura 43: Tramo de estudio seleccionado</i> .....	96
<i>Figura 44: Composición del tráfico en 2011</i> .....	97
<i>Figura 45: Distribución de costes de construcción. [Ministerio de Fomento]</i> .....	98
<i>Figura 46: Tasas de crecimiento interanuales e intertrimestrales del PIB [INE]</i> .....	113
<i>Figura 47: Evolución del IPC periodo 2002-2011 [Datos INE]</i> .....	114
<i>Figura 48: Tasa de Paro. [Datos INE]</i> .....	115
<i>Figura 49: Matriculación de vehículos pesados [Datos DGT]</i> .....	116
<i>Figura 50: Matriculación versus bajas vehículos ligeros. [Datos DGT]</i> .....	116
<i>Figura 51: Matriculación de vehículos ligeros [Datos DGT]</i> .....	117
<i>Figura 52: Matriculación versus bajas vehículos ligeros. [Datos DGT]</i> .....	118
<i>Figura 53: Variación anual del IMD en el tramo de estudio</i> .....	118
<i>Figura 54: Distribución de probabilidad del VAN social</i> .....	125
<i>Figura 55: Probabilidad acumulada VAN social</i> .....	125
<i>Figura 56: Función de distribución del VAN financiero</i> .....	126
<i>Figura 57: Probabilidad acumulada VAN financiero</i> .....	126
<i>Figura 58: Tramo de simulación de tráfico</i> .....	130
<i>Figura 59: Definición de la geometría del modelo Escenario 0</i> .....	131
<i>Figura 60: Definición de la geometría del modelo Escenario 1</i> .....	132
<i>Figura 61: Centroide entrada/salida modelo de la Nacional II Norte</i> .....	133
<i>Figura 62: Centroide entrada/salida del modelo de la Nacional II</i> .....	133
<i>Figura 63: Centroide entrada/salida al modelo carretera CM-2011 Este</i> .....	134
<i>Figura 64: Centroide entrada/salida al modelo carretera CM-2011 Oeste</i> .....	134
<i>Figura 65: Centroide entrada/salida al modelo carretera vehículos pesados Norte</i> .....	135
<i>Figura 66: Centroide entrada/salida al modelo carretera vehículos pesados Sur</i> .....	135
<i>Figura 67: Características vehículos ligeros</i> .....	137
<i>Figura 68: Características de los camiones</i> .....	137
<i>Figura 69: Parámetros de entrada vehículos ligeros</i> .....	140
<i>Figura 70: Parámetros de entrada vehículos pesados</i> .....	141
<i>Figura 71: Emisión CO vehículos ligeros en el modelo</i> .....	143
<i>Figura 72: Emisión NOx vehículos ligeros en el modelo</i> .....	144
<i>Figura 73: Emisión HC vehículos ligeros en el modelo</i> .....	144
<i>Figura 74: Definición de la demanda total del modelo</i> .....	146
<i>Figura 75: Variación horaria tipo [UC3M]</i> .....	147
<i>Figura 76: Ejemplo demanda de tráfico de vehículos pesados en el Escenario 0</i> .....	148
<i>Figura 77: Ejemplo demanda de tráfico de vehículos ligeros en el Escenario 0</i> .....	148
<i>Figura 78: Ejemplo demanda de tráfico de vehículos ligeros en el Escenario 1</i> .....	149
<i>Figura 79: Ejemplo demanda de tráfico de vehículos pesados en el Escenario 1</i> .....	149
<i>Figura 80: Simulación Escenario 0, “Situación actual”</i> .....	150
<i>Figura 81: Simulación Escenario 1, “Situación de estudio”</i> .....	151
<i>Figura 82: Flujo de vehículos en el modelo de simulación</i> .....	153
<i>Figura 83: Emisión de CO en el Escenario 0 para todos los vehículos</i> .....	154
<i>Figura 84: Emisión de CO en el Escenario 0 por vehículo</i> .....	154
<i>Figura 85: Emisión de HO en el Escenario 0 para todos los vehículos</i> .....	155
<i>Figura 86: Emisión de HO en el Escenario 0 por vehículo</i> .....	155
<i>Figura 87: Emisión de NOx en el Escenario 0 para todos los vehículos</i> .....	156
<i>Figura 88: Emisión de NOx en el Escenario 0 por vehículo</i> .....	156

<i>Figura 89: Combustible en el Escenario 0 para todos los vehículos.....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 90: Combustible en el Escenario 0 por vehículo .....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 91: Densidad en el Escenario 0 para todos los vehículos .....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 92: Densidad en el Escenario 0 por vehículo .....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 93: Distancia total en el Escenario 0 para todos los vehículos.....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 94: Distancia total en el Escenario 0 por vehículo.....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 95: Tiempo de demora en el Escenario 0 para todos los vehículos.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 96: Tiempo de demora en el Escenario 0 por vehículo.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 97: Tiempo de viaje en el Escenario 0 para todos los vehículos .....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 98: Tiempo de viaje en el Escenario 0 por vehículo .....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 99: Tiempo de viaje en el Escenario 0 para todos los vehículos .....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 100: Tiempo de viaje en el Escenario 0 por vehículo .....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 101: Emisión de CO en el Escenario 0 para todos los vehículos .....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 102: Emisión de CO en el Escenario 0 por vehículo .....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 103: Emisión de HO en el Escenario 1 para todos los vehículos .....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 104: Emisión de HO en el Escenario 1 por vehículo .....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 105: Emisión de NOx en el Escenario 1 para todos los vehículos.....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 106: Emisión de NOx en el Escenario 1 por vehículo .....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 107: Combustible en el Escenario 1 para todos los vehículos.....</i>	<i>167</i>
<i>Figura 108: Combustible en el Escenario 1 por vehículo .....</i>	<i>167</i>
<i>Figura 109: Densidad en el Escenario 1 para todos los vehículos .....</i>	<i>168</i>
<i>Figura 110: Densidad en el Escenario 1 por vehículo .....</i>	<i>168</i>
<i>Figura 111: Distancia total en el Escenario 1 para todos los vehículos.....</i>	<i>169</i>
<i>Figura 112: Distancia total en el Escenario 1 por vehículo.....</i>	<i>169</i>
<i>Figura 113: Tiempo de demora en el Escenario 1 para todos los vehículos.....</i>	<i>170</i>
<i>Figura 114: Tiempo de demora en el Escenario 1 por vehículo.....</i>	<i>170</i>
<i>Figura 115: Tiempo de viaje en el Escenario 1 para todos los vehículos .....</i>	<i>171</i>
<i>Figura 116: Tiempo de viaje en el Escenario 1 por vehículo .....</i>	<i>171</i>
<i>Figura 117: Tiempo de viaje en el Escenario 1 para todos los vehículos .....</i>	<i>172</i>
<i>Figura 118: Tiempo de viaje en el Escenario 1 por vehículo .....</i>	<i>172</i>
<i>Figura 119: Comparación de simulaciones con diferentes semillas .....</i>	<i>177</i>



# Índice de tablas

Tabla 1: Ejemplo composición del tráfico .....	10
Tabla 2: Niveles de servicio para una autopista .....	26
Tabla 3: Factor de corrección $F_C$ . Fuente UC3M .....	27
Tabla 4: Factor de corrección obstáculos laterales $F_0$ . Fuente UC3M .....	27
Tabla 5: Factores de equivalencia $E_C$ y $E_A$ . Fuente UC3M .....	28
Tabla 6: Niveles de servicio para autopistas y carreteras de cuatro o más carriles [UC3M] .....	29
Tabla 7: IMD tramo Guadalajara- Zaragoza. [Datos DGT] .....	97
Tabla 8: Estimación de la inversión total necesaria .....	98
Tabla 9: Inversión estimada anual .....	99
Tabla 10: Estimación de costes por kilómetros para vehículos pesados. ....	102
Tabla 11: Estimación de costes por kilómetro para vehículos ligeros .....	103
Tabla 12: Estimación de reducción costes por kilómetro de los vehículos ligeros .....	104
Tabla 13: Estimación de reducción de costes por kilómetro de vehículos pesados.....	105
Tabla 14: Necesidades de personal de una empresa tipo con 50 vehículos sin el proyecto. ....	106
Tabla 15: Necesidades de personal de una empresa tipo con 50 vehículos con el proyecto. ....	106
Tabla 16: Valor de los ahorros de tiempo en tiempo de trabajo en España para pasajeros. [Ministerio de Fomento] .....	107
Tabla 17: Valor de los ahorros de tiempo en tiempo de ocio en España [Ministerio de Fomento] .....	107
Tabla 18: Valor de los ahorros de tiempo en España para mercancías [Ministerio de Fomento] .....	107
Tabla 19: Matriculación de vehículos pesados. [Datos DGT] .....	115
Tabla 20: Matriculación de vehículos ligeros. [Datos DGT] .....	117
Tabla 21: Resumen de las principales variables del proyecto .....	121
Tabla 22: Componentes de los beneficios sociales mediante la aproximación del cambio en los excedentes .....	122
Tabla 23: VAN social y VAN financiero esperados .....	123
Tabla 24: Valores del VAN social y probabilidades para el año 40.....	124
Tabla 25: Valores del VAN financiero y probabilidades para el año 40.....	124
Tabla 26: Evolución IMD tramo de simulación [Datos DGT] .....	130
Tabla 27: Cálculo del consumo de combustible para cada estado del vehículo .....	139
Tabla 28: Tasa de emisión de contaminantes vehículos ligeros [QUARTET] .....	143
Tabla 29: Tasa de emisión de contaminantes vehículos pesados [QUARTET].....	143
Tabla 30: Variación horaria del tráfico en el modelo .....	147
Tabla 31: Resumen resultados obtenidos en la simulación del Escenario 0 .....	152
Tabla 32: Resumen resultados obtenidos en la simulación del Escenario 1 .....	163



# Índice de ecuaciones

<i>Ecuación 1: Intensidad de tráfico .....</i>	7
<i>Ecuación 2: Velocidad de circulación de un vehículo .....</i>	11
<i>Ecuación 3: Velocidad de recorrido de un vehículo .....</i>	11
<i>Ecuación 4: Velocidad media instantánea de un grupo de vehículos .....</i>	11
<i>Ecuación 5: Velocidad media de un tramo de un grupo de vehículos .....</i>	12
<i>Ecuación 6: Velocidad media en movimiento de un grupo de vehículos .....</i>	12
<i>Ecuación 7: Relación entre espaciamiento medio y densidad .....</i>	13
<i>Ecuación 8: Espaciamiento de seguridad simplificado .....</i>	14
<i>Ecuación 9: Espaciamiento de seguridad .....</i>	15
<i>Ecuación 10: Fórmula de R. Smeed .....</i>	15
<i>Ecuación 11: Intervalo .....</i>	15
<i>Ecuación 12: Intervalo medio. Relación con la intensidad .....</i>	15
<i>Ecuación 13: Ecuación fundamental del tráfico .....</i>	16
<i>Ecuación 14: Capacidad de un carril .....</i>	20
<i>Ecuación 15: Intensidad de servicio .....</i>	26
<i>Ecuación 16: Intensidad de servicio sin circulación de camiones.....</i>	28
<i>Ecuación 17: Relación densidad- velocidad según el modelo de Greenshields .....</i>	31
<i>Ecuación 18: Relación densidad- velocidad según el modelo de Greenberg .....</i>	32
<i>Ecuación 19: Relación entre la velocidad y la densidad según Underwood .....</i>	32
<i>Ecuación 20: Relación intensidad-densidad según el modelo de Greenshields .....</i>	33
<i>Ecuación 21: Relación intensidad-densidad según el modelo de Greenberg .....</i>	34
<i>Ecuación 22: Velocidad libre en el modelo de Gipps .....</i>	35
<i>Ecuación 23: Velocidad restringida en el modelo de Gipps .....</i>	36
<i>Ecuación 24: Velocidad en el modelo de Gipps.....</i>	36
<i>Ecuación 25: Valor Actual Neto Social.....</i>	60
<i>Ecuación 26: Valor Actual Neto Financiero .....</i>	60
<i>Ecuación 27: Relación entre VAN real y VAN nominal.....</i>	63
<i>Ecuación 28: Equivalencia entre términos reales y nominales .....</i>	63
<i>Ecuación 29: Tasa de descuento real.....</i>	63
<i>Ecuación 30: Tasa de descuento nominal .....</i>	63
<i>Ecuación 31: Precio generalizado .....</i>	64
<i>Ecuación 32: Beneficio Neto de un proyecto .....</i>	66
<i>Ecuación 33: Beneficio Neto con alternativas de transporte existentes .....</i>	66
<i>Ecuación 34: Beneficios sociales de un proyecto de transporte .....</i>	67
<i>Ecuación 35: Beneficio Neto de un proyecto incluyendo impuestos.....</i>	67
<i>Ecuación 36: Beneficio Neto de un proyecto incluyendo impuestos y subvenciones.....</i>	67
<i>Ecuación 37: Beneficio Neto incluyendo impuestos y alternativas de transporte .....</i>	68
<i>Ecuación 38: Beneficio social considerando externalidades.....</i>	69
<i>Ecuación 39: Beneficio social incluyendo externalidades y alternativas de transporte.....</i>	70

<i>Ecuación 40 : Excedente de los usuarios. Caso general.....</i>	<i>72</i>
<i>Ecuación 41: Excedente de los productores. Caso general .....</i>	<i>72</i>
<i>Ecuación 42: Beneficio Social Neto anual. Caso general.....</i>	<i>72</i>
<i>Ecuación 43: VAN Social. Caso general.....</i>	<i>72</i>
<i>Ecuación 44: VAN Social incluyendo impuestos y externalidades. Caso general.....</i>	<i>72</i>
<i>Ecuación 45: Beneficio social del proyecto asociado al tráfico desviado y generado .....</i>	<i>75</i>
<i>Ecuación 46: Condición necesaria para retrasar un proyecto .....</i>	<i>86</i>
<i>Ecuación 47: VAN social teniendo en cuenta las desviaciones en los costes de construcción .....</i>	<i>120</i>
<i>Ecuación 48: VAN financiero teniendo en cuenta las desviaciones en los costes de construcción .....</i>	<i>120</i>
<i>Ecuación 49: Consumo de combustible en la aceleración.....</i>	<i>138</i>
<i>Ecuación 50: Consumo de combustible a velocidad constante.....</i>	<i>138</i>
<i>Ecuación 51: Cálculo de las constantes <math>k_1</math> y <math>k_2</math> .....</i>	<i>139</i>



# Capítulo 1: Introducción y objetivos

# Introducción

A lo largo de la historia los descubrimientos y los avances tecnológicos han permitido mejorar el estatus de las personas e incrementar sus estándares de bienestar. En este sentido, las infraestructuras de carreteras siempre han jugado un papel clave en el progreso y el crecimiento económico de los países, debido tanto a los efectos directos de una mayor movilidad de los ciudadanos y mercancías, como a los efectos indirectos derivados de la construcción de una infraestructura.

El impacto económico de las carreteras y de los sectores relacionados con el transporte es muy fuerte. Los indicadores económicos demuestran la importancia de este sector en Europa. Incluso sin tener en cuenta, en términos monetarios, el consumo y los beneficios de los servicios de transporte, el volumen de negocios y el empleo relacionados con el sector de la carretera hacen incuestionable que este sector es uno de los más importantes hoy en día en Europa.

Debido a la pérdida de competitividad de Europa frente a otros países en crecimiento como son China e incluso India, es necesario innovar nuevas formas de transporte que hagan revertir esta tendencia y aumenten la eficiencia de las empresas que tengan relación con el sector de la carretera.

Mediante la automatización del transporte de mercancías por carretera siguiendo patrones ferroviarios, se pueden obtener una gran cantidad de beneficios que se explicarán a lo largo de este proyecto, que pueden derivar en una ventaja competitiva de las empresas españolas sobre el resto de empresas y que mejorará ampliamente la seguridad en la carretera, disminuyendo considerablemente la probabilidad de ocurrencia de los accidentes y además la comodidad de la conducción de los usuarios de vehículos ligeros también mejorará ya que el uno de los objetivos principales es separar el tráfico ligero del pesado en vías distintas.

# Objetivos

El objetivo fundamental del proyecto es el de analizar la viabilidad económica y técnica de la automatización del transporte de mercancías por carretera siguiendo patrones ferroviarios. Es decir, se pretende estudiar si es rentable o no para el sector privado invertir en una infraestructura y si la sociedad obtiene algún beneficio si éste se lleva a cabo. En base a ese objetivo principal, se proponen los siguientes objetivos parciales:

- Impulsar la economía, creando nuevos empleos y mejorando la movilidad por carretera.
- Aumentar la competitividad de las empresas frente a las empresas de los países emergentes.
- Mejorar la seguridad vial, separando el tráfico ligero del pesado.
- Mejorar la comodidad en la conducción de todos los usuarios.
- Reducir la contaminación generada.
- Situar a España en la vanguardia de la tecnología del sector del transporte.

# Fases del desarrollo

Para realizar este proyecto ha sido necesario realizar los siguientes pasos:

1. Estudio del estado de la técnica y selección de la mejor alternativa. Búsqueda y recopilación de la información contenida en las bases de datos de las oficinas de patentes de sistemas sobre sistemas que automaticen el transporte por carretera de diferentes vehículos.
2. Recopilación de datos de construcción de carreteras en España.
3. A partir de los datos obtenidos se procede al estudio de la viabilidad económica del proyecto. Para ello se estudia, teniendo en cuenta la incertidumbre producida en la estimación de cuatro variables, la rentabilidad obtenida por el sector privado y por la sociedad.
4. Realización de una simulación de tráfico para comprobar el aumento de la eficiencia del transporte que supondría automatizar la conducción de vehículos pesados
5. Conclusiones



# Estructura de la memoria

Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de cada capítulo:

- **Capítulo 2, Ingeniería del tráfico:** Se explica la teoría de la ingeniería del tráfico, para después proceder a la simulación del tráfico y al estudio de la viabilidad económica.
- **Capítulo 3, Estudio del estado de la técnica:** Aquí se explican las diferentes alternativas de automatización del transporte por carretera que se están desarrollando en la actualidad, para después elegir la más apropiada para la implantación del objeto de este proyecto.
- **Capítulo 4, Estudio de la viabilidad económica:** En este capítulo se estudia la rentabilidad social y financiera del proyecto. Para ello se calcula el VAN social y financiero, teniendo en cuenta la incertidumbre que hay intrínseca en la estimación de los valores de: costes de construcción, crecimiento de la demanda, valor del tiempo y proporción de vehículos que realizan la ruta completa. Con ello no sólo se calculará el valor del VAN, sino también la probabilidad de ocurrencia de que tome valores negativos.
- **Capítulo 5, Simulación del tráfico:** Se ha realizado una simulación microscópica de un tramo de la vía de estudio, para así comprobar el impacto que tendría automatizar el transporte de mercancías por carreteras en calzada única. Para ello se han creado dos escenarios, uno inicial que corresponde a la situación actual, denominado *Escenario 0* y otro, que es el que tiene interés para este proyecto, denominado *Escenario 1*.



# Capítulo 2: Ingeniería de tráfico



## 2.1 Introducción

En los inicios del automóvil, no se tenía consciencia de los problemas derivados del uso de estos, como son la contaminación, los atascos, la seguridad, etc. A partir de que Henry Ford revolucionase la producción del automóvil con la cadena de montaje en 1913, se facilitó el acceso al automóvil, debido a la reducción de costes y por tanto de precios, por lo que se consiguió que la demanda de automóviles aumentase considerablemente.

A partir de los años veinte empiezan a aparecer los problemas antes mencionados. Debido a esto surge la ingeniería del tráfico que intenta estudiar y subsanar estos problemas.

A raíz del creciente impacto de estos problemas en la sociedad, se desarrolló una nueva ciencia denominada Ingeniería del tráfico. Como consecuencia de la gran demanda de transporte por carretera que hay actualmente, la importancia de esta ciencia se ha visto incrementada.

Resumiendo, los principales objetivos de la Ingeniería del Tráfico son:

- Mejorar la eficiencia del transporte
- Mejorar la seguridad

La ingeniería de tráfico trabaja principalmente en:

- Planificación del tráfico y transporte
- Evaluación y asesoramiento del impacto del tráfico
- Simulación y modelado del transporte
- Política y planificación de aparcamientos
- Seguridad vial
- Análisis financiero y económico del transporte
- Señalización y regulación
- Planes de transporte público

En este proyecto se busca simular el tráfico en un tramo de carretera, desviando al tráfico de vehículos pesados, para así separarlos de los ligeros.



## 2.2 Variables fundamentales de la ingeniería del tráfico

Las variables fundamentales del tráfico se explican en las siguientes páginas.

### 2.2.1 Intensidad

La intensidad es el número de vehículos que atraviesan una sección determinada de una carretera por unidad de tiempo. Se distinguen dos tipos de intensidad: horaria y diaria en función de si el tiempo se toma en horas o día)

$$I = \frac{n(x)}{t}$$

*Ecuación 1: Intensidad de tráfico*

Donde:

$n(x)$ ; Número de vehículos que atraviesan una sección fija en la vía ( $x$ )

$t$ : Intervalo temporal estudiado (segundos, horas, días, etc.)

Como norma general el concepto de intensidad se aplica para intervalos temporales iguales o superiores a una hora. Para estudios en los cuales el tiempo de estudio sea menor, se emplean las variables de volumen de tráfico e intensidad horaria equivalente.

Hay dos conceptos de intensidad que tienen especial importancia en la ingeniería del tráfico:

- Intensidad Horaria Punta: Es la intensidad horaria medida durante la hora representativa de las condiciones de mayor circulación. Se utiliza para determinar la capacidad de las vías, control del tráfico, coordinación de semáforos y ordenación de la circulación.
- Intensidad Media Diaria Anual (IMD): Número total de vehículos que han pasado por una sección de carretera durante un año dividido por 365. Sus unidades son vehículos/día. Es la magnitud más utilizada para caracterizar la intensidad en las carreteras, para conocer de forma general el tráfico en una zona determinada, realizar estadísticas, conocer tendencias, etc.

## 2.2.2 Ciclos de intensidad de tráfico

La intensidad de tráfico varía con el transcurso del tiempo y está sometida a variables aleatorias que en muchos casos son muy difíciles de controlar. Sin embargo, las variaciones de la intensidad se pueden prever, ya que presenta un carácter cíclico en el tiempo.

Antes de la crisis había una tendencia de crecimiento en las variaciones de intensidad en Europa. Esta tendencia creciente se aprecia con claridad cuando se estudian las intensidades medias diarias (IMD) correspondientes a una serie de años. Este crecimiento general de las intensidades de tráfico se debe principalmente al aumento de la población, de la renta y del grado de motorización. El crecimiento de la IMD está relacionado con el crecimiento económico, cuanto más grande sea éste, mayor incremento de intensidad media se tendrá.

Tal como se muestra en el *apartado 4.5* del Capítulo 4, la intensidad media diaria del tramo de estudio ha disminuido desde que comenzó la crisis. Conseguir que el transporte sea mucho más eficiente, y por tanto más rentable, logrará el impulso de la economía y hará crecer considerablemente la demanda de transporte rodado.

Los principales ciclos de intensidad utilizados son el anual, el semanal y el diario.

### 2.2.2.1 Ciclo anual de la intensidad

Para el dimensionamiento de carreteras es importante conocer el ciclo de intensidad de tráfico anual, es decir, conocer la media de vehículos que transitan una determinada vía a lo largo de un año. Con esto se consigue prever el número de vehículos que va a circular en la carretera en el futuro y tomar las medidas oportunas. En la siguiente figura se representan las intensidades del día medio de cada mes en forma de porcentaje de la IMD total del año. Las gráficas corresponden a tres años consecutivos y, como puede observarse, son muy similares:

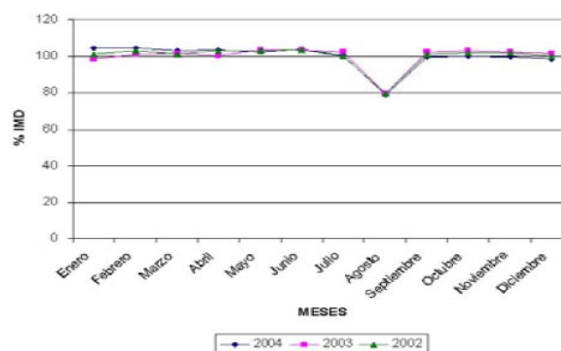


Figura 1: Ciclo Intensidad Anual de Madrid. [Fuente UC3M]

La variación del tráfico de una carretera es sensible a diferentes factores tales como:

- Carácter turístico de las zonas por donde discurre el tráfico.
- Proximidad de una zona rural a una gran población, que suele generar viajes de recreo de corto recorrido.

Los factores que hacen que el ciclo tenga un carácter uniforme son los siguientes:

- Cercanía a zona industrial.
- Alta proporción de vehículos pesados.
- Cercanía al centro de una ciudad.

### 2.2.2.2 Ciclo semanal de la intensidad

Las variaciones semanales de la intensidad dependen de si el día es laborable o no, del tipo de vía, condiciones atmosféricas o proximidad a una gran ciudad.

### 2.2.2.3 Distribución de frecuencias de intensidades horarias

Lógicamente la intensidad tampoco es uniforme a lo largo del día. Durante la noche las intensidades son muy bajas, presentándose un valor mínimo de madrugada. La intensidad horaria crece después rápidamente hasta las 8 o 6 de la mañana. En la siguiente figura se muestra la distribución horaria en un día laborable medio en la Nacional II

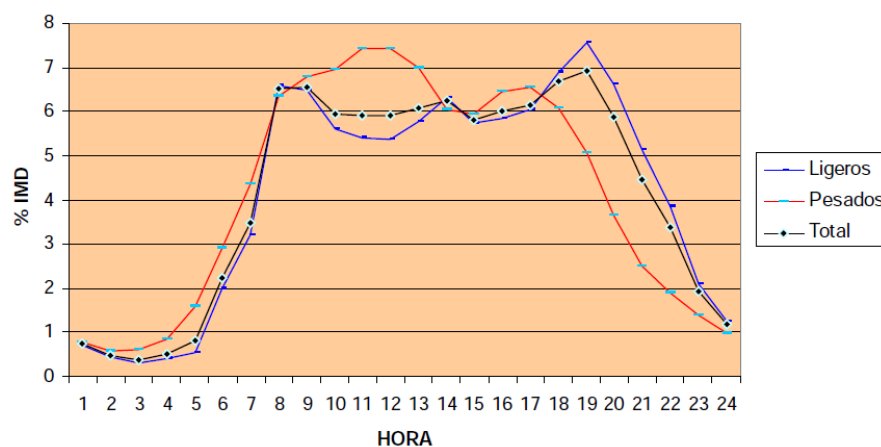


Figura 2: Distribución horaria del tráfico medio [Ministerio de Fomento]



### 2.2.3 Factor de Hora Punta (FHP)

Tiene en cuenta las variaciones del tráfico a corto plazo, normalmente, una hora. Con este factor se puede determinar si el tráfico de una carretera es homogéneo o no. Para determinar la capacidad de circulación de una sección es imprescindible considerar las intensidades punta. El intervalo de tiempo que se tiene en cuenta en el cálculo del FHP es menor en el caso de las autopistas que en el resto de carreteras. Esto se debe a que las variaciones de tráfico en las autopistas son más rápidas debido a que en ellas se produce circulación más continua que en el resto de carreteras.

### 2.2.4 Composición del tráfico

Además de conocer el número total de vehículos que pasan por una determinada vía, puede interesar clasificarlos en determinadas categorías. La composición del tráfico se define mediante el porcentaje de vehículos en la IMD que pertenecen a cada categoría. La proporción de vehículos influye en gran medida sobre las condiciones de tráfico. Según los intereses de cada estudio, la clasificación puede variar. Un ejemplo puede ser el que se resume:

TIPO DE VEHÍCULO	DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL
Camionetas y furgones	5 %
Autobuses	1 %
Turismos	85 %
Motocicletas	9%
<b>TOTAL</b>	<b>100,00%</b>

*Tabla 1: Ejemplo composición del tráfico*



## 2.2.5 Velocidad

La velocidad es la variable fundamental del tráfico más difícil de determinar, debido a que los vehículos circulan a diferente velocidad. Además la velocidad de un vehículo concreto no tiene por qué permanecer constante durante el trayecto. Por tanto para estudiarla la ingeniería del tráfico utiliza diferentes conceptos de velocidad: velocidad de un vehículo y de un grupo de vehículo.

### Velocidad de un vehículo

#### 1. Local o instantánea

Es la velocidad de un vehículo al atravesar una sección determinada de la vía

#### 2. De circulación

Es la distancia recorrida en un tramo entre el tiempo en movimiento invertido en recorrerla. Su expresión analítica viene dada por:

$$V_c = \frac{\text{Distancia recorrida en un tramo}}{t_{\text{movimiento}}}$$

*Ecuación 2: Velocidad de circulación de un vehículo*

#### 3. De recorrido

Se calcula igual que la anterior, solo que en esta ocasión se tiene en cuenta todo el tiempo invertido, indistintamente si el vehículo está en movimiento o no:

$$V_c = \frac{\text{Distancia recorrida en un tramo}}{t}$$

*Ecuación 3: Velocidad de recorrido de un vehículo*

### Velocidad de un grupo de vehículos

#### 4. Media instantánea (local o espacial)

Es la suma de la velocidad de cada vehículo dividido entre el número de vehículos que se haya tomado como referencia.

$$V_{t,e} = \frac{\sum V_j}{n}$$

*Ecuación 4: Velocidad media instantánea de un grupo de vehículos*





## 5. Media en un tramo

Se calcula dividiendo la longitud del tramo a estudiar entre la media de los tiempos invertidos por un número “n” de vehículos. La expresión viene dada por:

$$V_r = \frac{L}{\frac{\sum t_j}{n}} = \frac{nL}{\sum t_j}$$

*Ecuación 5: Velocidad media de un tramo de un grupo de vehículos*

## 6. Media en movimiento

Es el cociente entre la longitud de un tramo y la media de los tiempos empleados por un grupo de n vehículos en recorrerlo, sin contabilizar el tiempo de las paradas que hayan efectuado en el trayecto.

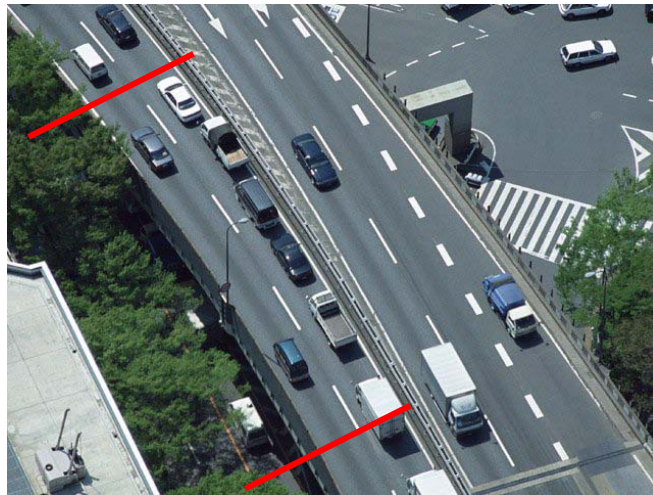
$$V_c = \frac{\text{Longitud de un tramo}}{t_{\text{movimiento}}}$$

*Ecuación 6: Velocidad media en movimiento de un grupo de vehículos*

La velocidad media en movimiento siempre será menor o igual que la media en un tramo. Lógicamente será igual en el caso de que los vehículos estén en movimiento constante.

## 2.2.6 Densidad

La densidad se define como el número de vehículos que ocupan un tramo de carretera de longitud dada en un instante de tiempo determinado, por lo que habitualmente se mide en vehículos/km. Ésta depende de la longitud media de los vehículos, por lo que si hay mucha presencia de camiones y autobuses la densidad disminuye. Conociendo la densidad de una carretera se puede saber la libertad de maniobra dentro de la corriente de tráfico, por lo que es un parámetro crítico en la descripción de las operaciones de tráfico.



*Figura 3: Tramo para medir la densidad de tráfico*

El cálculo de la densidad se puede calcular indirectamente conociendo la velocidad media de recorrido y la intensidad mediante la siguiente expresión:

$$I = D \cdot V$$

La densidad está relacionada con otras dos variables: Separación e Intervalo.

**Espaciamiento o separación:** Es la distancia entre las partes frontales de un vehículo y el que lo sucede en un instante determinado. El espaciamiento medio es inversamente proporcional a la densidad. Es decir, éste será menor cuanto más denso sea el tráfico.

$$s_m = \frac{1}{D}$$

*Ecuación 7: Relación entre espaciamiento medio y densidad*



Por medidas de seguridad se debe dejar una distancia mínima denominada espaciamiento de seguridad. En diferentes pruebas realizadas por el INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) para la DGT en un circuito de pruebas, se demostró que el mantenimiento de la distancia de seguridad permite evitar accidentes, realizar una conducción más cómoda y descansada y, además, reducir hasta en un 25% el consumo de combustible. Según la DGT por no respetar la distancia de seguridad ocurren diferentes tipos de accidentes, como colisiones por alcance o colisiones múltiples, las cuales causan la muerte de cientos de personas al año. Por ejemplo en el año 2006 murieron 247 personas por esta causa.

En una primera aproximación, se puede estimar un espaciamiento seguro en función de la longitud media de los vehículos y del espacio recorrido durante el tiempo de reacción. La media de tiempo de reacción se sitúa entre los 0,75 y 1 segundos, durante los cuales se recorrerá una distancia que dependerá de la velocidad a la que se circule y del estado físico del conductor y no del vehículo. Según esto, la separación media se calcularía con la siguiente fórmula:

$$s_s = a + \left(\frac{V}{3,6}\right) t$$

*Ecuación 8: Espaciamiento de seguridad simplificado*

Siendo:

a: longitud media de los vehículos

t: tiempo de percepción

V: Velocidad del vehículo en km/h

La velocidad tiene una gran importancia en el valor del espaciamiento de seguridad. A mayor velocidad más espacio se recorre antes de detener completamente el vehículo. En la distancia de detención influyen de manera importante el estado de la vía (factores meteorológicos y estado del firme), el estado del vehículo y el estado del conductor.

De las pruebas realizadas en diferentes modelos de coches por el INTA se deduce que la distancia de detención, desde que el conductor ve encenderse las luces de freno del vehículo que le precede hasta la completa detención, está en función del tiempo de reacción del conductor y de la velocidad a la que circule. Además está relacionada con el estado de los neumáticos, frenos y amortiguadores, de la masa del vehículo, del firme de la vía y de si éste está seco o no.



Además de estas hipótesis, existen otra serie de fórmulas matemáticas para calcular la separación segura entre vehículos. Estas fórmulas incluyen, en general, tres sumandos:

$$s_s = a + bV + cV^2$$

*Ecuación 9: Espaciamiento de seguridad*

Donde:

- Primer sumando (a): Es una constante que depende únicamente de la longitud de los vehículos.
- Segundo sumando: Lineal en función de la velocidad y del espacio recorrido durante el tiempo de reacción.
- Tercer sumando: Cuadrático en función de la velocidad, incluye el efecto adicional del frenado.

Según los valores que se den a los parámetros a, b y c se obtendrán diferentes relaciones. Las siguientes expresiones son las más utilizadas:

$$s_s = 5,35 + 0,22V + 9,4 \cdot 10^{-4}V^2$$

*Ecuación 10: Fórmula de R. Smeed*

$$s_s = 8 + 0,2V + 0,003V^2$$

**Intervalo:** Es el tiempo que transcurre entre el paso de dos vehículos sucesivos por una misma sección. El valor medio de los intervalos es inversamente proporcional a la intensidad de tráfico. Se mide en s/vehículo.

$$\tau = t_2 - t_1 = \frac{s}{V}$$

*Ecuación 11: Intervalo*

$$\tau_m = \frac{\sum \tau}{n} = \frac{1}{I}$$

*Ecuación 12: Intervalo medio. Relación con la intensidad*



## 2.3 Ecuación fundamental del tráfico

La ecuación fundamental del tráfico relaciona a la intensidad de tráfico, densidad y velocidad. Con esta relación se pueden dimensionar carreteras o ver el estado de saturación de las mismas. Suponiendo tráfico homogéneo, una velocidad media  $V$  y una separación o espaciamiento  $s$ , se tiene:

$$\tau = t_2 - t_1 = \frac{s}{V} = \frac{1}{I}$$

$$s = \frac{1}{D}$$

Por tanto:

$$I = D \cdot V$$

### *Ecuación 13: Ecuación fundamental del tráfico*

Si el tráfico fuese homogéneo, es decir, todos los vehículos circularan a la misma velocidad y guardando la misma separación con el vehículo precedente, el razonamiento anterior sería suficiente para establecer la relación entre las tres variables fundamentales. Sin embargo, la realidad es que dichas variables varían de forma aleatoria. Por esta razón, la obtención de la ecuación requiere un razonamiento más riguroso, considerando la intensidad, la velocidad y la densidad como variables aleatorias discretas o continuas. Esto se tratará más adelante.

Como se describe en la *ecuación 13*, la ecuación fundamental del tráfico, relaciona las tres variables básicas del tráfico, de forma que la circulación en un tramo de carretera en un momento dado queda perfectamente descrita por tres valores: velocidad, densidad e intensidad. Representando gráficamente esta ecuación se obtienen una curva tridimensional. Sin embargo, en la práctica resulta más sencillo trabajar con proyecciones de dicha curva sobre los ejes coordenados:



### 2.3.1 Relación entre densidad por carril y velocidad media

Si la densidad en un tramo de carretera es muy baja significa que sobre dicho tramo hay pocos vehículos circulando. De esta forma, los vehículos pueden circular a la velocidad que deseen, pudiendo ser ésta tan alta como el vehículo, la vía y las condiciones meteorológicas lo permitan.

Sin embargo, si la densidad aumenta quiere decir que en el tramo de estudio circulan más vehículos, por lo que la velocidad de cada vehículo se verá afectada por la de los vehículos más lentos.

La velocidad media resulta así, una función de la densidad, que alcanza un valor máximo cuando la densidad tiende a ser nula, y disminuye linealmente al aumentar la densidad llegando, incluso, a anularse cuando la densidad del tráfico alcanza su valor máximo.

Resumiendo: si circulan pocos vehículos la densidad será muy baja, por lo que el tráfico puede fluir a la velocidad de proyecto. Se dice entonces que la velocidad es libre. Al aumentar el número de vehículos los vehículos deben adaptar su velocidad a las condiciones del tráfico, hasta que si sigue aumentando la densidad hasta un valor máximo se produce la congestión.

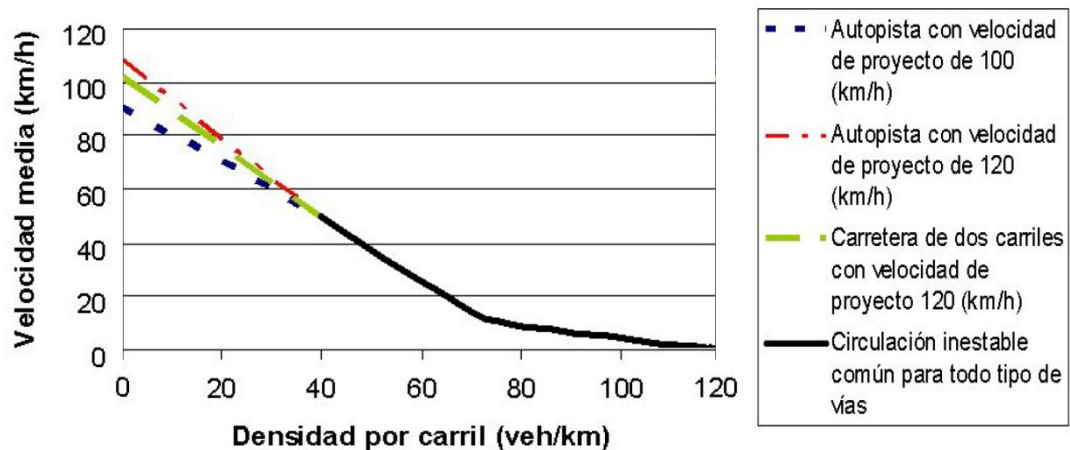


Figura 4: Relación entre velocidad y densidad [UC3M]

### 2.3.2 Relación entre intensidad y densidad

Observando la *ecuación 13* (ecuación fundamental del tráfico) se llega a la conclusión que cuando la intensidad es nula, también lo es la densidad. Sin embargo la intensidad se anula en dos casos:

1. La densidad es nula, es decir, no hay vehículos en la calzada.
2. La densidad es máxima, es decir, existen tantos vehículos en la calzada que están completamente parados, por lo que no atraviesan ninguna sección de la vía.

Como se tienen dos valores nulos de intensidad relativos a la mínima y a la máxima intensidad, se deduce que entre ambos puntos debe existir un máximo. La densidad para la cual se alcanza la intensidad máxima se denomina densidad crítica y suele ser entre un 30-40 % de la densidad máxima.

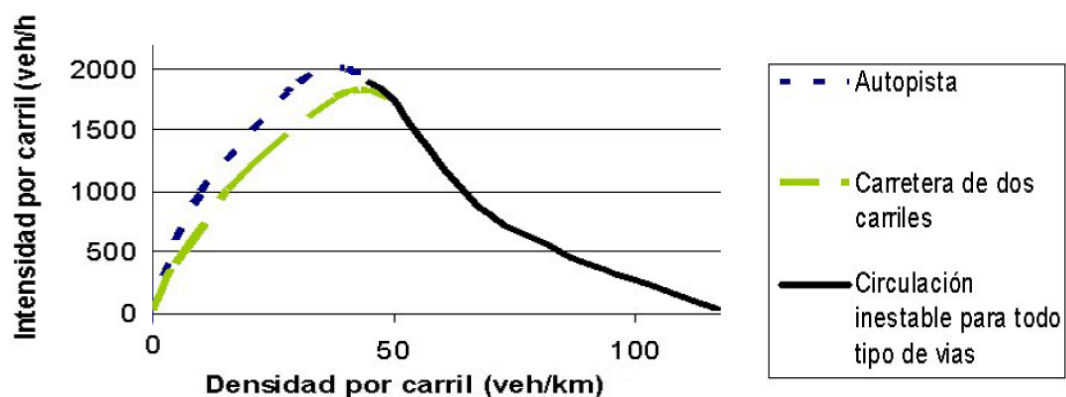
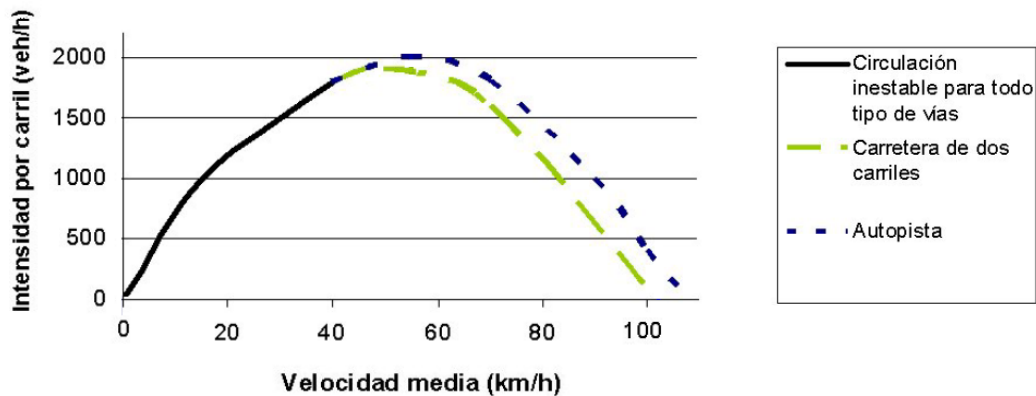


Figura 5: Relación entre intensidad y densidad [UC3M]

Para valores de densidad menores a la densidad crítica, la circulación es fluida y estable. Para valores mayores a la densidad crítica la circulación no es tan fluida y cualquier incidente en la circulación provoca una mayor saturación del tráfico. En estas condiciones la vía no es capaz de absorber el tráfico, por lo que los vehículos tienen que disminuir su velocidad. Por esta razón, aunque la densidad aumente, la intensidad de los vehículos que atraviesan una sección fija disminuye.

### 2.3.3 Relación entre velocidad e intensidad

En una situación real el objetivo suele ser deducir las condiciones de tráfico (que pueden definirse con la velocidad), conociendo la demanda de tráfico (definida la intensidad). Por esto la relación velocidad-intensidad tiene una importancia práctica mucho mayor que las otras dos relaciones.



*Figura 6: Relación entre velocidad e intensidad*

Si el número de vehículos es muy bajo, por tanto la intensidad es nula, estos podrán circular a la velocidad de proyecto, por lo que la velocidad será libre. A medida que aumenta el número de vehículos, se incrementa la intensidad por lo que la velocidad empezará a estar condicionada al tráfico hasta llegar a un valor máximo de la intensidad (densidad crítica). Si continúa el aumento en el número de vehículos se alcanzará la densidad máxima por lo que se producirá una congestión (parte izquierda del tráfico). Por tanto la intensidad y la velocidad serán nulas.

Según el tipo de vía el comportamiento será diferente, tal como se observa en figura anterior. Las curvas difieren para velocidades altas, mientras que son parecidas para valores bajos de velocidad. Se han realizado numerosos estudios para determinar cómo depende la relación velocidad-intensidad de la composición del tráfico y de las características de la carretera. Dichos estudios forman la base de los procedimientos para determinar la capacidad de las carreteras.





## 2.4 Capacidad y Niveles de servicio

### 2.4.1 Definición de capacidad

Se define la capacidad de un carril como el número máximo de vehículos que pueden pasar por un carril por unidad de tiempo. Se mide en vehículos/hora. Suponiendo una velocidad uniforme, su expresión analítica viene dada por:

$$C = \frac{V}{s_s} 1000$$

*Ecuación 14: Capacidad de un carril*

Donde:

V: Velocidad en km/h

S<sub>s</sub>: Separación media mínima entre vehículos

La intensidad tiene que ser menor a la capacidad. Si la intensidad iguala a la capacidad, los vehículos no pueden circular fácilmente, por lo que la velocidad media es baja. Además la separación entre vehículos es baja y se producen detenciones imprevistas frecuentemente; por tanto la probabilidad de colisión entre vehículos es muy alta.

En ocasiones las cifras de capacidad obtenidas mediante esta fórmula son extremadamente altas, por lo que suelen ser más útiles los resultados de capacidad obtenidos mediante observaciones y análisis de datos reales.

Las condiciones de circulación cuando la intensidad de vehículos alcanza el nivel de la capacidad son muy deficientes, por lo que habrá que diseñar las vías de forma que la capacidad sea mayor que la intensidad máxima esperada, teniendo cuidado con no sobredimensionar la vía, dado el alto coste económico que esto supone.



## 2.4.2 Definición de niveles de servicio e intensidad de servicio

El nivel de servicio es una medida cualitativa representativa del funcionamiento de una vía cuando soporta una determinada intensidad de tráfico, que tiene en cuenta un conjunto de factores, como la seguridad, la velocidad o la libertad de maniobra, que ocurren en ella. El nivel de servicio se define en función de las condiciones siguientes:

- Velocidad y tiempo de recorrido. Hay que tener en cuenta la velocidad instantánea y la velocidad media en un tramo. Al circular vehículos pesados por la vía, la velocidad media en un tramo disminuye considerablemente, por lo que si se eliminase la presencia de estos vehículos el nivel de servicio de la vía aumentaría.
- Interrupciones del tráfico, así como la magnitud y frecuencia de los cambios bruscos de velocidad necesarios para mantener la corriente de tráfico. En este sentido, si se estudia la circulación en vías de dos carriles por sentido, cuando circulan por éstas camiones o autobuses, al efectuar estos un adelantamiento por el carril izquierdo, los vehículos que circulan a mayor velocidad, tienen que reducirla considerablemente.
- Libertad de maniobra para mantener la velocidad deseada. Con la presencia de vehículos pesados esto es más complicado. Por ejemplo, si un turismo circula a 100 km/h por el carril derecho de una autovía y el vehículo que le precede a 500 m es un camión que circula a 80 km/h, el conductor del turismo tendrá que reducir la velocidad y permanecer en el carril o adelantar al camión por el carril izquierdo. En esta situación lo más probable es que tenga que aumentar la velocidad para no entorpecer la circulación del tráfico.
- Seguridad, incluyendo no sólo los índices de accidentes sino también el peligro potencial. Los accidentes de vehículos pesados no son tan frecuentes como los accidentes en los que están involucrados los turismos. Sin embargo el peligro potencial de la colisión de un camión con otro vehículo es muy superior a la de un turismo.
- Comodidad en la conducción. Ésta se ve considerablemente reducida con la circulación de camiones en las vías debido a las causas explicadas en puntos anteriores. Además habría que añadir otras como, reducción de visibilidad, emisión de gases, efecto del viento al adelantar a un camión, espacio de circulación, etc.

- Economía. Debido a la circulación de los vehículos pesados el deterioro de las carreteras es mucho mayor, debido al peso de las cargas y del camión en sí. Por tanto los costes de mantenimiento son mucho mayores de lo que serían si estos no circularan por las carreteras. Al construir una carretera para poder separar el tráfico pesado del ligero, el Estado o la empresa competente, pueden centrar sus esfuerzos en las vías por las que circulan los vehículos de transporte de mercancías. Además el consumo de combustible disminuiría debido a que la conducción sería más fluida y con menos cambios de velocidad necesarios para realizar adelantamientos. Esto supondría un impacto muy positivo para la Economía y para el medio ambiente medio-largo plazo.

El nivel de servicio está relacionado con la intensidad. Se define **intensidad de servicio** como la máxima intensidad compatible con un determinado nivel de servicio.

### 2.4.3 Niveles de servicio en circulación continua

En condiciones de circulación continua puede hablarse de seis niveles de servicio:

- Nivel de servicio A: La densidad del tráfico es muy baja, por lo que los conductores pueden circular a la velocidad que deseen, sin que se vean obligados a modificarla a causa de otros vehículos.



*Figura 7: Nivel de servicio A*

- Nivel de servicio B: La velocidad de los vehículos se ve influida por la de los otros, pero las condiciones de la vía y de la circulación permiten que los vehículos más rápidos puedan conseguir velocidades medias superiores a 90 km/h en autopistas y a 80 km/h en otras carreteras. Las carreteras se suelen dimensionar de tal manera que las condiciones de circulación no sean peores a las que corresponden a un nivel de servicio B, salvo unas pocas horas al año.



*Figura 8: Nivel de servicio B*

- Nivel de servicio C: La velocidad de la mayoría de los vehículos deberá ajustarse a la de los vehículos que les preceden. La posibilidad de adelantamiento es reducida y se forman grupos de vehículos que circulan a la misma velocidad. Aunque la circulación sigue siendo estable, se pueden presentar puntas de tráfico durante cortos periodos de tiempo que den lugar a situaciones inestables. Las autopistas se suelen diseñar para que no se sobrepase este nivel de servicio en las horas punta.



*Figura 9: Nivel de servicio C*

- Nivel de servicio D: Todos los vehículos tienen que regular su velocidad en función de la del vehículo precedente. Las velocidades son reducidas y hay imposibilidad de adelantamiento. Se aproxima a la inestabilidad y cualquier incremento de la intensidad de tráfico da lugar a la detención.



*Figura 10: Nivel de servicio D*

- Nivel de servicio E: En este caso la intensidad de tráfico iguala a la capacidad de la vía. Se producen largas colas con una separación muy pequeña entre vehículos, imposibilidad de maniobrar. Se producen detenciones bruscas frecuentemente.



*Figura 11: Nivel de servicio E*



- Nivel de servicio F: Corresponde a la situación de congestión producida cuando la intensidad de tráfico sobrepasa a la capacidad. Alcanzar este nivel de servicio es síntoma de que existe una sección cuya capacidad no puede absorber la demanda.



*Figura 12: Nivel de servicio F*

Para determinar el nivel de servicio a la que se encuentra una vía, en la práctica se realiza de acuerdo a dos parámetros: la velocidad de servicio y la relación entre la intensidad y la capacidad de servicio.



## 2.4.4 Niveles de servicio y capacidad (I/C) en autopistas

Si se quiere estudiar el nivel de servicio de una autopista se utiliza el cociente de la intensidad de tráfico entre la capacidad de la vía. En la siguiente tabla se muestra el valor que debe tener el cociente I/C para los diferentes niveles de servicio.

Nivel de servicio	Velocidad de servicio (km/h)	I/C		
		Velocidad específica de la vía $\geq 110$ km/h	Velocidad específica de la vía $= 100$ km/h	Velocidad específica de la vía $= 80$ km/h
A	$\geq 100$	$\leq 0,3$	No es posible alcanzar este nivel de servicio para ningún I/C	No es posible alcanzar este nivel de servicio para ningún I/C
B	$\geq 90$	$\leq 0,5$	$\leq 0,2$	No es posible alcanzar este nivel de servicio para ningún I/C
C	$\geq 70$	$\leq 0,75$	$\leq 0,5$	$\leq 0,25$
D	$\geq 60$	$\leq 0,9$	$\leq 0,85$	$\leq 0,7$
E	$< 60$	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$

Tabla 2: Niveles de servicio para una autopista [UC3M]

El valor por carril, en condiciones ideales, de la capacidad de una autopista con más de seis carriles oscila entre 2200 vehículos/h y 2300 vehículos/h. Se consideran condiciones ideales de circulación las siguientes:

- Únicamente circulan vehículos ligeros, con ausencia total de camiones, autobuses, motos o vehículos especiales.
- Los carriles deben ser de, al menos, 3,6 m de anchura y con arcenes libres de obstáculos de 1,8 metros de ancho.

Por tanto, si se consigue desviar el tráfico de camiones de las autopistas la capacidad de la vía estará más cerca de la capacidad ideal.

**Determinación de la intensidad de servicio:** Si las condiciones no se ajustan a lo expuesto anteriormente, se deben aplicar una serie de factores de corrección para calcular la capacidad real.

$$I_s = C_{CI} \cdot n \cdot \left(\frac{I}{C}\right)_s \cdot F_c \cdot F_0 \cdot \frac{100}{100 - P_c - P_A + E_c P_c + E_A P_A}$$

Ecuación 15: Intensidad de servicio



Siendo:

$C_{CI}$ : Capacidad en condiciones ideales (Ec.14)

$F_C, F_0$ : Factores de corrección

$P_C$ : Porcentaje de camiones

$P_A$ : Porcentaje de autobuses

$E_C, E_A$ : Factores de equivalencia

$(I/C)_s$ : Cociente intensidad/capacidad para el nivel de servicio deseado. Para determinar la capacidad de la vía este cociente debe ser igual a la unidad.

$n$ : número de carriles.

El factor de corrección según el ancho de los carriles  $F_C$ , suponiendo circulación de vehículos ligeros únicamente y carriles de arcenes libres en 1,8 m, se determina con la siguiente tabla:

Anchura de cada carril (m)	Factor de corrección para autopistas de 2 carriles	Factor de corrección para autopistas de 3 ó 4 carriles
3,6	1,00	1,00
3,3	0,88	0,97
3,0	0,81	0,91
2,7	0,76	0,81

*Tabla 3: Factor de corrección  $F_C$ . [UC3M]*

El factor de corrección según los obstáculos laterales  $F_0$ , suponiendo circulación de vehículos ligeros únicamente y carriles de, al menos, 3,6 m de ancho, se determina con la siguiente tabla:

Distancia al obstáculo desde el borde de la calzada (a ambos lados) (m)	Ancho efectivo de dos carriles de 3,6 m	Factor de corrección para autopistas de 3 ó 4 carriles
1,8	7,2	1,00
1,5	6,6	0,92
0,6	6,0	0,83
0	5,1	0,72

*Tabla 4: Factor de corrección obstáculos laterales  $F_0$ . [UC3M]*





También se ha de tener en cuenta la composición del tráfico. Se considera que cada vehículo pesado, y de igual manera los autobuses, se comportan como varios vehículos ligeros. Esta equivalencia varía en función de las características de la vía de estudio. Si los tramos estudiados son relativamente largos, se pueden utilizar los siguientes factores de equivalencia de camiones  $E_C$  y de autobuses  $E_A$ :

	Terreno llano	Terreno ondulado	Terreno accidentado
Camiones ( $E_C$ )	2	4	8
Autobuses ( $E_A$ )	1,6	3	5

*Tabla 5: Factores de equivalencia  $E_C$  y  $E_A$  [UC3M]*

Si eliminamos de las autopistas el tráfico de vehículos de transporte de mercancías la intensidad de servicio vendrá dada por:

$$I'_s = C_{CI} \cdot n \cdot \left(\frac{I}{C}\right) \cdot F_c \cdot F_0 \cdot \frac{100}{100 - P_A + E_A P_A}$$

$$I'_s > I_s$$

*Ecuación 16: Intensidad de servicio sin circulación de camiones*

Se tiene que la nueva intensidad máxima que permite la autopista es mayor que la intensidad de servicio en el caso de que circularsen camiones. Por tanto, la capacidad de la vía se ve incrementada.



## 2.4.5 Niveles de servicio y capacidad en autovías y carreteras de calzada única con cuatro o más carriles

En este apartado se estudiarán las carreteras que tienen calzadas separadas que no cumplen con las condiciones de autopistas y las de calzada única con dos o más carriles para cada sentido de la circulación. Cuando la circulación es continua, la circulación en estas carreteras presenta características similares a las de las autopistas, aunque los niveles de servicio conseguidos están influenciados por las entradas y salidas de la carretera, que obligan a los vehículos más lentos a ocupar los carriles internos. El nivel de servicio se calcula de manera análoga al de las autopistas, salvo que los valores numéricos del cociente intensidad/ capacidad son diferentes. En la siguiente tabla se muestra el nivel de servicio para autovías y carreteras con cuatro o más carriles.

Nivel de servicio	Velocidad de servicio (km/h)	I/C		
		Velocidad específica de la vía $\geq 110$ km/h	Velocidad específica de la vía $= 100$ km/h	Velocidad específica de la vía $= 80$ km/h
A	$\geq 100$	$\leq 0,3$	No es posible alcanzar este nivel de servicio para ningún I/C	No es posible alcanzar este nivel de servicio para ningún I/C
B	$\geq 90$	$\leq 0,5$	$\leq 0,2$	No es posible alcanzar este nivel de servicio para ningún I/C
C	$\geq 70$	$\leq 0,75$	$\leq 0,5$	$\leq 0,25$
D	$\geq 60$	$\leq 0,9$	$\leq 0,85$	$\leq 0,7$
E	$< 60$	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$

*Tabla 6: Niveles de servicio para autopistas y carreteras de cuatro o más carriles [UC3M]*

La capacidad de este tipo de vías, en condiciones ideales es de 2200 vehículos/h por carril. Las condiciones ideales son las mismas que para las autopistas. Los factores correctores son, casi en su totalidad, los mismos salvo:

- Para carreteras de calzada única se pueden emplear sólo el mismo factor de corrección por anchura de carriles cuando tienen tres o cuatro carriles por sentido. Para carreteras con calzadas separadas se pueden emplear exactamente los mismos factores correctores que para las autopistas



- Factor de corrección por obstáculos laterales: En carreteras de una sola calzada, normalmente sólo existen obstáculos a un solo lado y se pueden emplear los mismos coeficientes. Sin embargo, cuando existan obstáculos en el centro y la distancia es superior a 0,6 m del borde interior de la calzada, no es necesario tenerlo en cuenta.
- Los factores de equivalencia por el tipo de vehículo son los mismos que para autopistas.



## 2.5 MODELOS DE TRÁFICO

Los modelos de tráfico tienen como propósito predecir las variables características del tráfico antes descritas, para así, poder diseñar las vías en las fases de proyecto y gestionar el tráfico en las fases de explotación.

### 2.5.1 Modelos macroscópicos

Este tipo de modelos consideran que el tráfico se aproxima a un flujo continuo de materia, regido por unas leyes de movimiento propias. Para ello, se necesitan variables que describen el fenómeno en su conjunto, como la velocidad media del flujo, etc.

En el punto 1.2 se han definido algunas de las variables que se utilizarán en estos modelos. Como el tráfico depende del espacio y del tiempo, hay que emplear una nueva nomenclatura para estas variables que permita considerar esto.

#### 2.5.1.1 Modelos que relacionan la velocidad y la densidad

Si se considera estudiar la relación entre las tres variables fundamentales el estudio se complica considerablemente. Por esta razón los modelos más sencillos estudian la relación entre dos de ellas. A continuación se verán diferentes modelos que relacionan la velocidad con la densidad. Cada modelo obtiene mejores resultados para diferentes características del tráfico.

##### Modelo de Greenshields

La principal hipótesis es que existe una relación lineal entre la velocidad y la densidad, suponiendo que el flujo de tráfico es continuo. Greenshields obtuvo la relación partiendo de las siguientes suposiciones:

- La densidad máxima corresponde a la situación en la que los vehículos están pegados unos a otros y por lo tanto parados ( $v=0$ )
- La velocidad máxima se produce cuando la densidad tiende a cero, es decir, en condiciones de tráfico libre.

El modelo responde a la siguiente ecuación:

$$V = V_{tl} \cdot \left(1 - \frac{D}{D_{m\acute{a}x}}\right)$$

*Ecuación 17: Relación densidad- velocidad según el modelo de Greenshields*

Donde  $V_{tl}$  es la velocidad de tráfico libre y  $D_{m\acute{a}x}$  es la densidad máxima.

### Modelo de Greenberg

Este modelo se basa en el anterior para relacionar la densidad y la velocidad mediante una formulación logarítmica utilizando la velocidad óptima y la densidad máxima. Se denomina velocidad óptima a la velocidad a la que la vía alcanza la mayor intensidad.

$$V = V_0 \cdot \ln\left(\frac{D_{máx}}{D}\right)$$

*Ecuación 18: Relación densidad- velocidad según el modelo de Greenberg*

Se ha demostrado que este modelo es muy útil para predecir el comportamiento del tráfico pesado.

### Modelo de Underwood

Este modelo se ajusta especialmente bien al comportamiento de tráfico ligero. La relación entre la velocidad y la densidad están en función de la densidad en condiciones de intensidad máxima y de la velocidad en condiciones de tráfico libre y viene dada por la siguiente expresión:

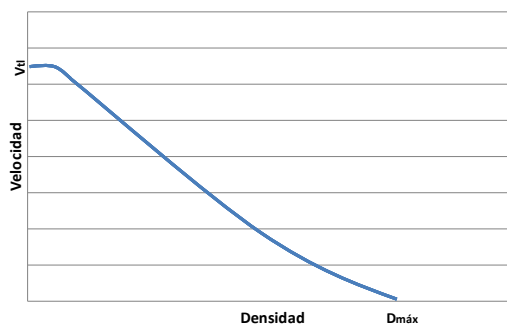
$$V = V_{tl} \cdot e^{\frac{-D}{D_{lmáx}}}$$

*Ecuación 19: Relación entre la velocidad y la densidad según Underwood*

La representación gráfica del modelo de Underwood es muy similar a la del modelo de Greenberg.

### Modelos generales multi-régimen

Todos los modelos anteriores son aproximaciones bastante útiles, sin embargo ninguno de ellos recoge exactamente la relación velocidad-densidad que, según datos experimentales, tiene una forma parecida a la que se representa en la siguiente figura:



*Figura 13: Relación velocidad-densidad obtenida mediante datos experimentales*

La relación presenta dos zonas de no linealidad, una para densidades altas y otra para densidades bajas. Entre estas dos zonas hay una que es prácticamente lineal. Los modelos multi-régimen intentan representar la anterior curva en sus diferentes regímenes. Uno de los más utilizados es el modelo de Eddie, que combina los modelos de Greenberg para densidades altas y el de Underwood para densidades bajas.

### 2.5.1.2 Modelos que relacionan la intensidad y la densidad

La mayoría de los modelos que relacionan la intensidad con la densidad se obtienen combinando la ecuación fundamental del tráfico con los modelos estudiados en el apartado anterior. Dos de los modelos intensidad-densidad más conocidos son el modelo parabólico y el modelo logarítmico. A continuación se explicará cada uno por separado.

#### Modelo parabólico de intensidad-densidad

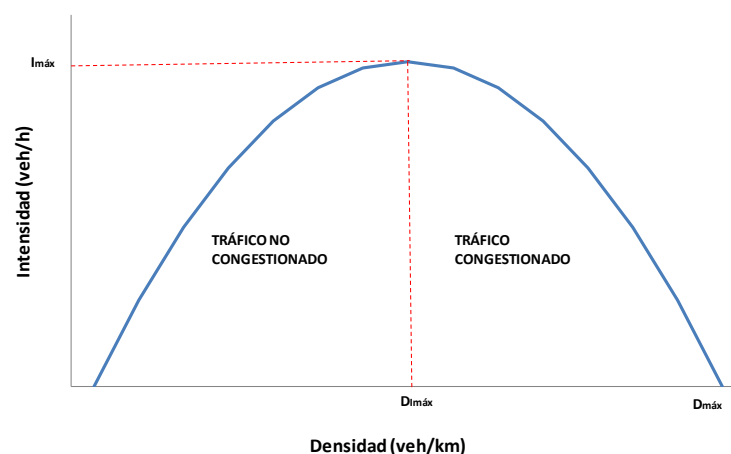
Introduciendo la ecuación del modelo de Greenshields en la ecuación fundamental del tráfico puede obtenerse la relación buscada.

$$V = V_{tl} \cdot \left(1 - \frac{D}{D_{m\acute{a}x}}\right)$$

$$I = D \cdot V = D \cdot V_{tl} \cdot \left(1 - \frac{D}{D_{m\acute{a}x}}\right) = D \cdot V_{tl} - \frac{D^2 \cdot V_{tl}}{D_{m\acute{a}x}}$$

*Ecuación 20: Relación intensidad-densidad según el modelo de Greenshields*

Si se representa gráficamente:



*Figura 14: Relación densidad-intensidad según el modelo de Greenshields*

$I_{m\acute{a}x}$  es la intensidad máxima que permite el carril.  $D_{m\acute{a}x}$  es la densidad en condiciones de intensidad máxima. Como se indica en la figura anterior, para valores de

densidad inferiores a  $D_{Imáx}$ , el flujo de tráfico es estable. Para valores superiores a ésta, representan condiciones de tráfico congestionado.

### Modelos logarítmicos de intensidad-densidad

Si ahora se combina la ecuación fundamental del tráfico con la expresión de Greenberg se obtiene la siguiente relación:

$$I = D \cdot V = D \cdot V_0 \cdot \ln\left(\frac{D_{máx}}{D}\right)$$

*Ecuación 21: Relación intensidad-densidad según el modelo de Greenberg*

### 2.5.1.3 Modelos que relacionan la velocidad y la intensidad

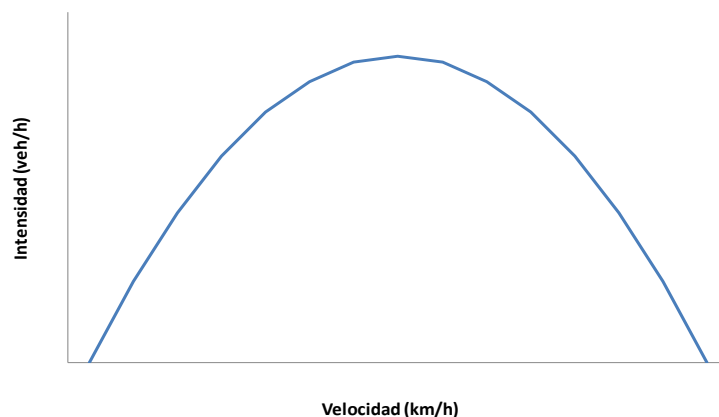
De la misma forma que en las relaciones anteriores, para relacionar las variables fundamentales del tráfico de la velocidad y la intensidad se recurre a los modelos estudiados y a la ecuación fundamental del tráfico. De esta forma si despejamos la densidad en la ecuación de Greenshield se tiene:

$$D = \left(1 - \frac{V}{V_{tl}}\right) \cdot D_{máx}$$

Introduciendo esta ecuación en la ecuación fundamental del tráfico se obtiene:

$$I = D \cdot V = V \cdot \left(1 - \frac{V}{V_{tl}}\right) \cdot D_{máx} = \left(V - \frac{V^2}{V_{tl}}\right) \cdot D_{máx}$$

Por tanto la forma general que responde a estos modelos es igual a:





## 2.5.2 Modelos microscópicos

La modelización microscópica se basa en el estudio del comportamiento de cada conductor o vehículo de forma individual para que, integrando el conjunto de vehículos, se pueda obtener información sobre el flujo vial en su totalidad.

Las limitaciones que presenta este planteamiento son las siguientes:

- La reacción de los conductores frente a una misma situación puede ser diferente.
- La reacción de cada conductor depende de un gran número de parámetros, como pueden ser la hora del día, día de la semana, condiciones meteorológicas, etc.

Los modelos microscópicos se clasifican en: modelos de seguimiento de vehículos, modelos de teoría de colas y modelos de autómatas celulares.

### Modelos de seguimiento de vehículos

El objetivo de estos modelos es determinar cómo influye el comportamiento de un vehículo en los que lo siguen. Considera vías de un único carril en las cuales no está permitido adelantar, por lo que un conductor se ve forzado a seguir a su predecesor. Los modelos de Pipes y de Letzbach son los más conocidos. Coinciden en que la separación que deben guardar los vehículos varía con la velocidad de los mismos. Otro modelo conocido es el de Jepsen, que es similar al de Letzbach, con la diferencia de que distingue el comportamiento del conductor en función de su experiencia.

#### - Modelo de Gipps

El modelo de Gipps es el más utilizado por los programas disponibles de simulación, como es el caso de AIMSUN. Este modelo es un modelo empírico. Permite que el vehículo seguidor circule a dos velocidades diferentes en función de las características del tráfico y del vehículo.

Una de dichas velocidades es la velocidad correspondiente a un flujo libre en el que la circulación no está restringida. La expresión analítica es:

$$V_{n+1a}(t+T) = V_{n+1}(t) + 2,5 \cdot a_{n+1} \cdot T \cdot \left(1 - \frac{V_{n+1}(t)}{V_{n+1}^*}\right) \cdot \sqrt{0,0025 + \frac{V_{n+1}(t)}{V_{n+1}^*}}$$

*Ecuación 22: Velocidad libre en el modelo de Gipps*





Donde:

$V_{n+1}(t)$ : Es la velocidad del vehículo n+1 en el instante t

$V_{n+1}^*$ : Es la velocidad deseada del vehículo n+1

$a_{n+1}$ : Es la aceleración máxima del vehículo n+1

La segunda velocidad del modelo es la velocidad máxima a la que puede circular el vehículo debido a sus propias características y a la presencia del vehículo predecesor.

$$V_{n+1_b}(t+T) = d_{n+1} \cdot T + \sqrt{d_{n+1}^2 \cdot T^2 - d_{n+1} \cdot \left\{ 2 \cdot [x_n(t) - L_n - x_{n+1}(t)] - V_{n+1}(t) \cdot T - \frac{V_n(t)^2}{d_n} \right\}}$$

*Ecuación 23: Velocidad restringida en el modelo de Gipps*

Donde:

$d_n$ : Es la máxima deceleración del vehículo n

$L_n$ : Es la longitud del vehículo n

La velocidad final del vehículo seguidor será el mínimo de las dos velocidades mencionadas, ya que, si la segunda es mayor que la primera, implica que la presencia del vehículo n no impone ninguna restricción en el movimiento del vehículo n+1. Por el contrario si la segunda velocidad resulta ser menor que la primera, el vehículo n + 1, debe adecuar su movimiento a lo impuesto por el vehículo precedente. Por esta razón la expresión de la velocidad del vehículo seguidor viene dada por la siguiente expresión:

$$V_{n+1}(t+T) = \min \{V_{n+1_a}(t+T), V_{n+1_b}(t+T)\}$$

*Ecuación 24: Velocidad en el modelo de Gipps*



### **Modelos de teoría de colas**

En muchas ocasiones, se producen retrasos por congestiones causadas por diferentes motivos, por lo que es interesante estimar los tiempos de espera, la longitud de la cola, etc. La teoría de colas aplicada a los problemas de transporte considera que los vehículos acceden a un determinado lugar donde reciben un servicio durante un intervalo de tiempo. Si dicho intervalo supera al de llegada de otros vehículos, dará lugar a la formación de colas de espera. Para modelizar las colas es necesario especificar algunas características y parámetros del sistema:

### **Modelos autómatas celulares**

Un autómata celular es un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos. Aplicado al estudio del tráfico, es un modelo de espacio tiempo discretos, donde cada célula del autómata equivale a un vehículo en movimiento con cierta velocidad o a un espacio vacío de la vía estudiada. Los modelos como el de Nager- Schreckenberg son capaces de modelar adecuadamente los fenómenos de congestionamiento en las autopistas, a pesar de su sencillez

## **2.5.3 Modelos mesoscópicos**

Estos modelos combinan las características de los modelos microscópicos y los macroscópicos. La unidad considerada en estos modelos es el vehículo, pero su movimiento sigue las leyes de los modelos macroscópicos. Con este tipo de modelos se mejora la fiabilidad de los modelos macroscópicos sin requerir la precisión de datos que necesitan los microscópicos. No se distinguen unidades vehiculares, sino que se definen funciones de distribución de probabilidad.



# **Capítulo 3: Estudio del estado de la técnica**



## 3.1 Introducción

En este capítulo se explicará la tecnología actual que posibilita la conducción automática de vehículos y los avances que se están logrando en este campo. La información disponible en los diferentes medios es bastante escasa debido a que el desarrollo de dicha tecnología es muy reciente y aún se está investigando para mejorar los resultados obtenidos hasta la fecha.

A lo largo de la historia, la humanidad ha estado en una búsqueda constante de mejoras para implantar en la vida cotidiana y, así, hacer las tareas habituales de una manera más cómoda y eficaz. La automatización de los vehículos terrestres puede suponer una revolución en el transporte por carretera ya que puede cambiar por completo la forma en la que viajan las personas y se transportan las mercancías. Esto supondría eliminar por completo el factor humano en la conducción, lo cual significa un aumento considerable en la seguridad y consumo de carburantes.

Aplicándolo al sector de transporte de mercancías, la automatización supone grandes ventajas para las empresas que implanten este sistema en sus vehículos.

- Reducción de gastos en personal, no es necesario tener un conductor por cada vehículo.
- Aumento considerable en la seguridad, ya que se elimina el factor humano en la conducción por lo que los accidentes pueden reducirse en su totalidad.
- Optimización de rutas de transporte. La instalación del sistema de automatización del transporte supone la centralización de la información de todos los vehículos de la empresa (situación exacta, tiempo de viaje restante para alcanzar destino, número de paradas realizadas, etc.) Incluso el ordenador de a bordo del vehículo puede enviar información en tiempo real de diferentes indicadores del vehículo, como puede ser, el estado de neumáticos, nivel de aceite, nivel de líquido refrigerante, etc. Con esto la empresa conoce en cada momento la situación de cada vehículo y se puede anticipar a los posibles problemas que puedan aparecer.
- Otra gran ventaja consiste en que la información que tiene la empresa en tiempo real de la localización de sus camiones permite remitir con mayor facilidad la fecha y la hora de llegada de los productos a sus clientes. Esto es ampliamente útil en las empresas que vendan sus productos a través de internet y que realicen envíos a domicilio. Cada vez los clientes son más exigentes y solicitan a las empresas más información acerca de su pedido. Realizar el tracking en tiempo real a camiones convencionales es muy complicado, sin embargo, con este sistema se simplifica ampliamente, ya que la empresa que lo incorpore a sus camiones sabrá en cada instante la localización de su vehículo.



- Los transportes se realizan en menos tiempo. Según el reglamento CE 561/2006 los tiempos de conducción son como sigue: Tras un periodo de conducción de cuatro horas y media, el conductor hará una pausa ininterrumpida de al menos 45 minutos. El número máximo de horas diarias de conducción, con sus correspondientes pausas es de nueve horas diarias. Dos veces por semana se puede ampliar a diez horas diarias, teniendo en cuenta que la conducción máxima semanal es de 56 horas. Debido a estas restricciones el camión tiene que estar un tiempo parado, que supone una posible pérdida de comercio para la empresa. Algunas empresas recurren a tener a más de un conductor por camión para que esté el mayor tiempo en movimiento posible, con el correspondiente coste económico que esto supone. Con el sistema de automatización, la presencia humana en la conducción se elimina, por lo que teóricamente el vehículo puede estar en movimiento en todo momento. El transporte de mercancías es prácticamente continuo, únicamente el camión se detiene en la carga y descarga en los puntos de partida y de destino.
- Reducción de la congestión en las carreteras. Como se demostró en el capítulo anterior la intensidad de servicio de las autopistas aumenta, si se elimina del flujo de tráfico a los vehículos pesados.
- Posibilidad de rediseño de vehículos para hacerlos más ligeros y eficientes. En el caso de los vehículos pesados la cabina del conductor ya no será necesaria, por lo que se puede eliminar.
- Comunicación entre vehículos. Al estar automatizada la conducción los vehículos pueden circular a mucha menos distancia unos de otros. Si un camión reduce la velocidad, envía una señal que frena a los camiones seguidores automáticamente. De esta forma, al circular a tan corta distancia, se reduce la resistencia al viento, lo que supone que descienda el consumo de combustible.

Las desventajas de los sistemas de automatización de vehículos son:

- Tecnología actualmente en desarrollo. Utilización únicamente en prototipos.
- Posibles ataques informáticos a los vehículos, lo que implica la necesidad de disponer de seguridad a nivel informático del vehículo.
- Pérdida de puestos de trabajo de los transportistas.
- Sobre costo de adquisición de vehículos debido a todos los dispositivos que hay que instalar.
- Mano de obra requerida de mayor cualificación.



- Necesidad y aceptación de cambios en las operaciones de las empresas.
- Inversión en sistemas de telecomunicación y ordenadores de alta capacidad de cómputo.

## DEFINICIONES

A continuación se definirán los elementos más relevantes que se utilizan en todos los enfoques que hay actualmente en el campo de la automatización de vehículos:

**Lidar:** Consiste en un sensor de barrido que realiza la emisión de pulsos láser y mide el tiempo que tardan dichos pulsos en llegar a un objeto y volver al sensor. Todos los rayos laser suelen salir en una única dirección, pero mediante un espejo rotatorio se desvían con un ángulo de apertura configurable, de forma que se realiza un barrido de una franja determinada del terreno conforme avanza el vehículo.

**GPS:** Se puede definir como Global Positioning System o Sistema de Posicionamiento Global. El GPS permite fijar la posición del vehículo, persona o incluso, del objeto que lo lleve equipado. Para fijar una posición el dispositivo localiza un mínimo de cuatro satélites de los que recibe las señales indicando posición y el reloj de cada uno. El GPS sincroniza su reloj y calcula el retraso de las señales.

**DGPS:** Consigue mayor exactitud que los sistemas GPS convencionales. Este receptor recibe información simultáneamente de los satélites y de una estación terrestre situada en un lugar cercano y conocido por el GPS. La información de la estación terrestre permite reducir el error cometido en la estimación de la posición realizada por medio de la información obtenida de los satélites. El margen de error de un GPS convencional suele estar entre los 60-100 metros. Un GPS diferencial puede llegar a realizar cálculos de posición con un error menor a 25 centímetros.



## 3.2 Estado de la técnica

A nivel mundial se está invirtiendo un gran esfuerzo en investigar la automatización de los vehículos por carretera debido a las innumerables ventajas que ésta conlleva. Muchas compañías, universidades y organismos públicos tienen, cada vez, más conciencia del gran potencial que tiene implantar estas tecnologías para toda la sociedad. El futuro de esta tecnología es prometedor, cada año se logran importantes avances, por lo que los prototipos que se está utilizando actualmente están más cerca de poder ser implantados sin que sea un riesgo para las personas. Existen muchos proyectos relacionados con este campo, por lo que en este capítulo el estudio del estado de la técnica se centrará en los más relevantes para el proyecto.

### PROYECTO iCab2 UC3M

La Universidad Carlos III de Madrid está desarrollando la fase segunda del proyecto iCab (Intelligent Car Automobile). Este proyecto consiste en automatizar un vehículo eléctrico de transporte al que se le envían las órdenes a través de un ordenador y, además, se puede controlar de forma manual mediante un joystick y pedales.

Al igual que todos los enfoques de automatización de vehículos que se describirán a continuación, se han instalado diferentes sistemas en el vehículo eléctrico para lograr que éste circule de forma autónoma. Los componentes principales que se han instalado al iCab para realizar la automatización del mismo son:

- Un láser
- Un sistema de visión estereoscópica
- Sistema GPS con acelerómetro

La plataforma iCab tiene un sistema de telecomunicaciones inalámbrico que permite el intercambio de información entre vehículos y entre vehículos e infraestructuras.

El iCab está siendo desarrollado para realizar transportes de personas y mercancías en un entorno urbano y dinámico, es decir, con cambios recurrentes en el entorno que hacen que no sea viable la introducción de rutas fijas para el autómata.

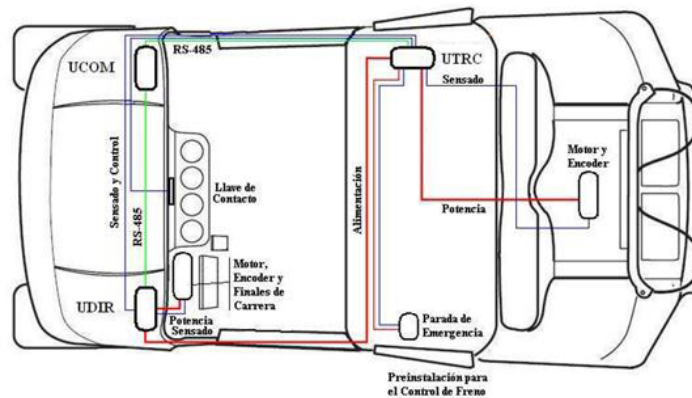


Figura 15: Configuración iCab

## PROYECTO AUTOPIA

En España, el Centro de Automática y Robótica (CAR) junto con la Universidad Politécnica de Madrid y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, han desarrollado el programa “AUTOPIA”, que consiste en el guiado automático del vehículo en maniobras individuales y colectivas. Los vehículos son guiados por un computador que ejecuta programas de inteligencia artificial que simulan el comportamiento de un conductor.

Los vehículos deben de estar provistos de sensores y dispositivos que comuniquen al ordenador central la situación del entorno para que éste pueda enviar las órdenes correspondientes a los sistemas de accionamiento de la dirección, freno y acelerador.

En este programa se ha logrado que diferentes vehículos circulen solos y se coordinasen entre ellos para circular en caravana, hacer adelantamientos, cambiar de carril, incorporarse a una rotonda o atravesar un cruce. La velocidad máxima a la que han podido llegar a circular los vehículos en las pruebas ha sido de 109 km/h.

El sistema de GPS diferencial debe ser complementado con un sistema de radio para recibir correcciones diferenciales, o bien con un sistema de comunicación inalámbrica, y así obtener una precisión de centímetros.





*Figura 16: Autobús proyecto AUTOPÍA [Proyecto AUTOPÍA]*



*Figura 17: Automóvil proyecto AUTOPÍA [Proyecto AUTOPÍA]*

El problema de este sistema es que depende de la precisión del navegador GPS. Los navegadores GPS no tienen la precisión necesaria ni están totalmente actualizados los desvíos o accidentes. Para que el vehículo sea totalmente capaz de circular por carretera de manera totalmente autónoma necesita conocer las condiciones exactas de la carretera.

El presente proyecto únicamente tiene en cuenta la circulación por vías interurbanas. Para este tipo de vías la información que necesita el vehículo es mucho más accesible que en vías urbanas, debido a que los cambios o incidentes son mucho menores. Además, al estar automatizados los vehículos la probabilidad de accidentes es casi nula. Las carreteras están equipadas con sistemas de comunicación con la DGT, por lo que en caso de accidente se puede transmitir en tiempo real la información a todos los vehículos que circulen por la vía, por lo que el autómata puede tomar las decisiones en función de los datos obtenidos.



## PROYECTO MIMICS

Otro proyecto que está siendo desarrollado en España, concretamente en la Universidad de Murcia con la colaboración del Ministerio de Fomento, y que tiene un enfoque diferente al de AUTOPIA, es el denominado MIMICS. Consiste en el desarrollo de un prototipo de sistema de convoy inteligente, en el que un coche delantero sirve de guía a un convoy de vehículos que circulan sin conductor. Así, el convoy consta de dos tipos de vehículos: un coche guía provisto de sensores que recogen información que es transmitida al vehículo seguidor, que incorpora una serie de sensores y actuadores.

El sistema de posicionamiento del proyecto MIMICS se basa en la tecnología EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), el cual está impulsado por la Agencia Espacial Europea (ESA) y está basado en el uso de tres satélites geoestacionarios y una red de estaciones terrestres. Este sistema de navegación por satélite se basa en las prestaciones que ofrecen los sistemas GPS. EGNOS proporciona la información necesaria para utilizar las señales provenientes de los satélites de navegación (para posibles aplicaciones críticas tales como la seguridad). En este sentido, este sistema mejora la precisión de las mediciones de posición de unos cinco metros a menos de dos metros. Por otro lado, informa a los usuarios de los errores en las mediciones de posición y advierte de la interrupción de una señal de satélite.

La señal del EGNOS se transmite por tres satélites geoestacionarios: uno sobre la parte oriental del Atlántico, otro sobre el Océano Índico, y el último por encima de África. Un transpondedor transmite señales vinculadas a los satélites de la tierra, que será donde se produce todo el procesamiento de la señal. En tierra hay 34 estaciones de Alcance e Integridad de monitoreo (RIMS), cuatro centros de control maestro y seis estaciones de enlace ascendente.

De esta forma se ha conseguido controlar el comportamiento del coche seguidor en un conjunto limitado pero significativo de situaciones, controlando de manera autónoma y desasistida, tanto la velocidad, la capacidad de freno y la dirección.

Las tecnologías que se han implantado en los vehículos son las que se resumen a continuación:

- Sistemas GPS y tecnología de posicionamiento europea EGNOS.
- Radar frontal para detectar obstáculos.
- Sistema de control inteligente.

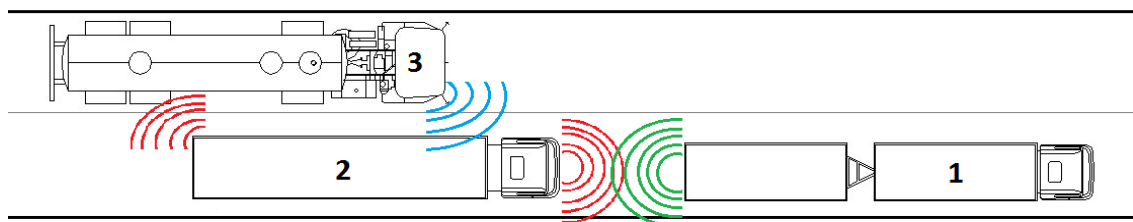
Los vehículos automatizados deben tener las siguientes modificaciones:

- Sistema de dirección con asistencia eléctrica. Mediante un motor eléctrico, utilizando las señales del sensor de par y posición absoluta, se acciona el eje de entrada conectado al volante. Un controlador difuso se encarga de mantener la columna en la posición adecuada.
- Sistema de acelerador electrónico. Este sistema acciona automáticamente la mariposa del sistema de inyección del vehículo. Un controlador difuso adaptativo se encarga de mantener la velocidad requerida en cada momento.
- Freno eléctrico. Para este proyecto han utilizado un motor paralelo al pedal que acciona un émbolo en el servofreno. Se realiza el accionamiento mecánico del pedal.
- Cambios en la carrocería para contener los sensores.
- Cambios en el salpicadero para contener los sistemas de monitorización.

## PROYECTO SARTRE

La marca automovilística Volvo está desarrollando un sistema que sigue la misma lógica que el MIMICS, al que han denominado tren de carreteras, SARTRE (Safety Roads Trains for the Environment). La diferencia con el proyecto español es que SARTRE está enfocado para que el vehículo “guía” sea un vehículo pesado, mientras que MIMICS ha realizado las pruebas con turismos únicamente. Sin embargo, el principio de los dos proyectos es el mismo. SARTRE puede ser enfocado para que los vehículos circulen en una caravana, en la que el primero actúa como guía y los demás siguen al que le precede automáticamente. Con este sistema sólo es necesario que el primer camión sea conducido por una persona, ya que el resto siguen al guía mediante las señales que les manda éste.

Los vehículos seguidores utilizan un sistema de sensores láser para controlar al vehículo que va en cabeza y a los vehículos de las inmediaciones. Esta es otra diferencia respecto al sistema MIMICS, que utiliza sensores radar para medir la distancia a los obstáculos y vehículos.



*Figura 18: Sistema de comunicación inalámbrica entre vehículos*

La ventaja de este sistema es que no es necesario realizar cambios en la infraestructura para funcionar y tampoco requiere la instalación de costosos componentes adicionales en los vehículos. Sin embargo, la principal desventaja que presenta es que no se automatizan completamente los vehículos, ya que es necesario que al menos un vehículo tenga conductor.

## PROYECTO GOOGLE

Google también está desarrollando su propio vehículo sin conductor. Es una de las compañías que más recursos está invirtiendo en esta tecnología. El proyecto comenzó en 2010. Se trata de un vehículo capaz de guiarse por mapas y utilizando un ordenador. Además utiliza diferentes tipos de dispositivos como cámaras, radares y telémetro láser para guiar y suministrar información al ordenador del entorno cercano. Los coches en prueba han recorrido un total de 500.000 km sin sufrir accidentes. Las condiciones de tráfico durante los ensayos fueron muy diferentes unas de otras, por lo que su sistema funciona perfectamente. Aún tienen que realizar muchas pruebas, como por ejemplo en condiciones meteorológicas adversas. El objetivo es realizar las próximas pruebas en condiciones de nieve. Es bastante similar al proyecto “AUTOPÍA” mencionado anteriormente, sólo que dispone de más recursos para realizar pruebas y desarrollar la tecnología.



*Figura 19: Prototipos de vehículos autónomos de Google [Google]*

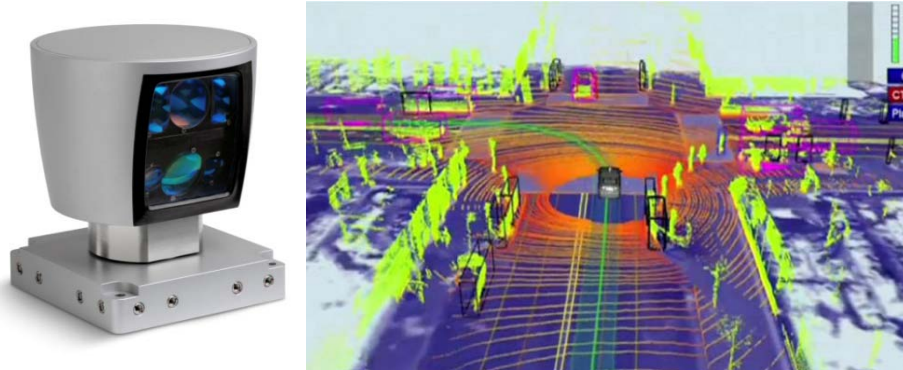
El estado de Nevada, en Estados Unidos, ha concedido a Google la primera licencia, en el mundo hasta la fecha, de circulación de este tipo de vehículos, por lo que la empresa puede realizar pruebas de funcionamiento en tránsito real. De esta forma Google podrá mejorar sustancialmente su prototipo.

La novedad del sistema de Google es el dispositivo que es colocado en la parte superior del vehículo, el cual se denomina “LIDAR” (Laser Imaging Detection and Ranging). Este dispositivo emite haces láser que rebotan sobre los objetos del entorno. De esta forma el sistema detecta objetos y mide la distancia y posición que los separa del vehículo.

El modelo de LIDAR que emplea Google en sus prototipos es el Velodyne HDL-64E S2. Consta de 64 rayos láser, y gira sobre sí mismo 360° de forma permanente hasta



quince veces por segundo. De esta manera puede realizar una imagen tridimensional del entorno que rodea al vehículo. Detecta todo tipo de objetos: peatones, vehículos, semáforos, árboles, etc.)

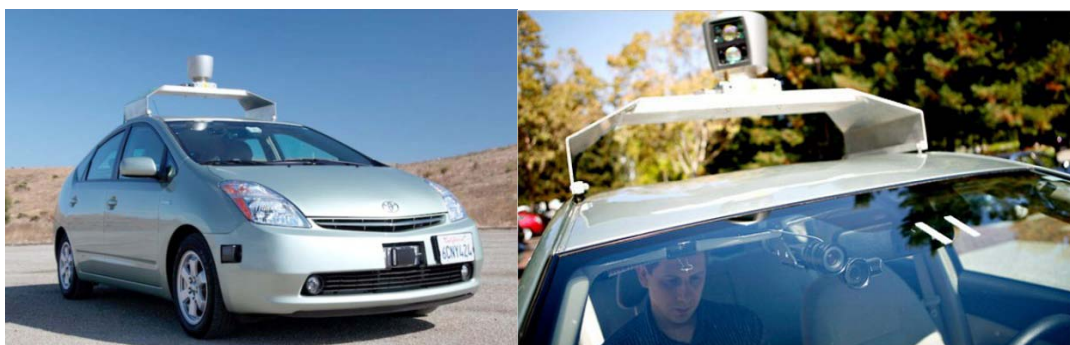


*Figura 20: Modelo LIDAR más utilizado e imagen generada [Velodyne]*

El sistema LIDAR tiene que complementarse con el resto de dispositivos, posicionamiento GPS, unidad de medición inercial, radares, mapas, etc. La unidad de medición inercial mide la aceleración y velocidad angular del vehículo mediante acelerómetros, giroscopios y reguladores de voltaje.

Además, el vehículo de Google cuenta con cuatro radares. Tres colocados en la parte frontal del vehículo y uno en la parte trasera. Estos radares miden la distancia a la que se encuentran los objetos que rodean al coche y complementan la información del entorno obtenida por el LIDAR. El radar delantero mide la distancia con el vehículo precedente para que el coche guarde una distancia de seguridad suficiente. Los laterales supervisan que los carriles estén libres y el trasero se usa en maniobras de marcha atrás.

Además, se coloca una cámara en el parabrisas para controlar semáforos, señales de tráfico, líneas de la calzada, etc.



*Figura 21: Radares y cámara del parabrisas*



El tramo que va a realizar el vehículo de forma autónoma es recorrido primero por un ingeniero que toma anotaciones e introduce la información correspondiente en el sistema.

El sistema necesita tener una capacidad de respuesta muy grande, puesto que tiene que manejar muchos datos y la toma de decisiones se debe realizar rápidamente. Por esto el vehículo de Google está conectado a la red y utiliza la capacidad de cómputo de la nube para realizar los cálculos. Es lo que se conoce como “Cloud Computing”. Esto es una gran ventaja respecto a las otras alternativas ya que la mayoría de los cálculos los realizan ordenadores que no están físicamente en el vehículo, por lo que se reduce considerablemente el espacio necesario para alojar a los sistemas requeridos.



### 3.3 Descripción del sistema

Cada sistema de los mencionados anteriormente, puesto que tienen enfoques diferentes, requerirá diferentes componentes para poder realizar la automatización. Por ejemplo, el vehículo de Google utiliza un lidar, mientras que el iCab no lo necesita. Sin embargo, hay muchos dispositivos que son comunes en todos los enfoques ya que son imprescindibles para implantar la automatización en los vehículos.

#### 1. Ordenador Central:

- a. CPU
- b. Memoria RAM
- c. Dispositivos de almacenamiento de datos
- d. Tarjeta de entrada/salida de datos USB
- e. Conexiones

#### 2. Unidad sensores

- a. Sensores de proximidad: Radar, laser.
- b. Cámaras de grabación de imágenes en tiempo real

#### 3. Dispositivos de Posicionamiento

- a. GPS
- b. D-GPS

#### 4. Sistemas de accionamiento

- a. Motor eléctrico (dirección)
- b. Accionamientos electrónicos (acelerador)
- c. Accionamientos mecánicos (freno)

#### 5. Dispositivos de telecomunicaciones

- a. Dispositivos inalámbricos de telecomunicaciones

El sistema interactúa con el entorno que rodea al vehículo y, mediante el uso de software con lenguaje de programación basado en la teoría de los métodos difusos, envía las instrucciones al sistema de accionamiento para realizar las maniobras necesarias en cada momento. Al ser un sistema basado en inteligencia artificial, éste recopila la información y la almacena para tomar decisiones cada vez más rápido, mediante el “auto-aprendizaje”, en las futuras situaciones a las que se verá sometido.

Cada vehículo consta de un sistema de telecomunicaciones, que permite la conexión entre el vehículo y los ordenadores de la empresa. Además el sistema de telecomunicaciones es el encargado de intercambiar información con el resto de vehículos que circulan por la carretera, de esta manera el vehículo obtiene información



del estado de la carretera de un punto por el que aún no ha pasado y además conoce en todo momento la posición del resto de vehículos.

Las órdenes pueden darse al vehículo directamente mediante una pantalla táctil o un teclado o enviándole la información a través de un ordenador. La empresa que tenga instalado este sistema en sus vehículos, puede programar las rutas desde cualquier parte del mundo. Simplemente necesitará un ordenador y una conexión a internet para enviar las órdenes al vehículo. Además se podrá acceder de forma inmediata a toda la información relativa al vehículo como puede ser el consumo de gasolina y cantidad restante, tiempo de recorrido, tiempo restante hasta llegada a destino, tiempo de paradas y la velocidad, etc.

A continuación se detalla cómo funciona el sistema de automatización del transporte por carreteras:

El primer paso es introducir la ruta que ha de realizar el vehículo. A partir de aquí el sistema tomará las decisiones automáticamente, salvo que se indique al vehículo que se detenga.

Detalle de procesamiento de la información y toma de decisiones.

### **3.3.1 Inputs de información del sistema**

Los sensores de proximidad detectan si hay algún objeto cerca del vehículo o si se aproxima alguno. Captan la posición del objeto. Las dos formas usadas son mediante sistemas radar o mediante laser. El sistema láser es más preciso para distancias cortas y es complementado con el sistema de radar para localizar objetos más lejanos.

Mediante las cámaras de vídeo se guía al vehículo a través del trazado de la carretera. Captan imágenes de semáforos, pasos de peatones, vehículos, etc. Algunas cámaras tienen capacidad de grabación en el espectro infrarrojo, que permiten la captación de imágenes en ausencia de luz.

Se pueden instalar sensores de luz a los vehículos para medir la intensidad lumínica en todo momento y en caso de descender considerablemente (túneles, noche, etc.), las luces de cruce se enciendan automáticamente. Aunque con el sistema que se describe no son necesarias las luces, éstas se encienden por seguridad, es decir, para que el resto de vehículos y personas puedan conocer la localización del vehículo.

Señal GPS: El receptor GPS recibe la señal de los satélites mediante la cual determina la posición del vehículo. Si se utilizan sistemas DGPS, además se recibirán señales de una estación en tierra que permitirá obtener una gran precisión en el cálculo de la posición del vehículo.





El vehículo se comunica con los que circulan cerca de él mediante los dispositivos de telecomunicación. Además puede recibir información del estado de la carretera, meteorológica, etc. y en función de ésta adecuar la velocidad a cada situación.

### **3.3.2 Procesado del INPUT**

Toda esta información se guarda en la memoria y se envía al procesador, el cuál toma las decisiones óptimas en función de la situación. Por ejemplo, si hay una curva, el trazado de la carretera será curvo, por lo que el procesador interpretará que el vehículo tiene que girar para no salirse de la carretera, produciéndose un accidente en caso contrario. Si el sistema detecta que delante del vehículo hay un objeto inmóvil tomará las decisiones para corregir la trayectoria y/o velocidad y así evitar una colisión, teniendo en cuenta si hay terceros vehículos en el entorno inmediato del camión. Una vez seleccionada la mejor solución, ésta se almacena en memoria para futuras situaciones que sean parecidas y así realizar más rápido la toma de decisiones.

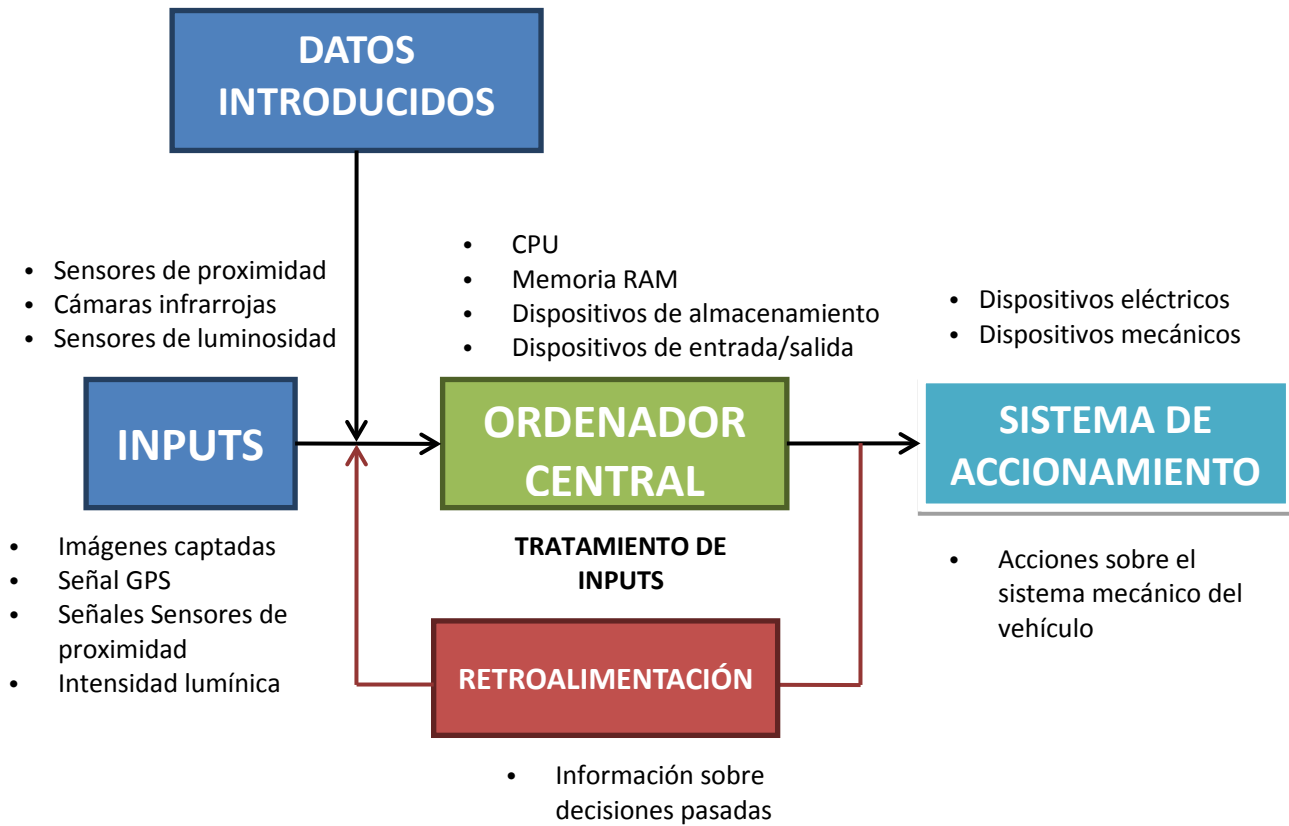
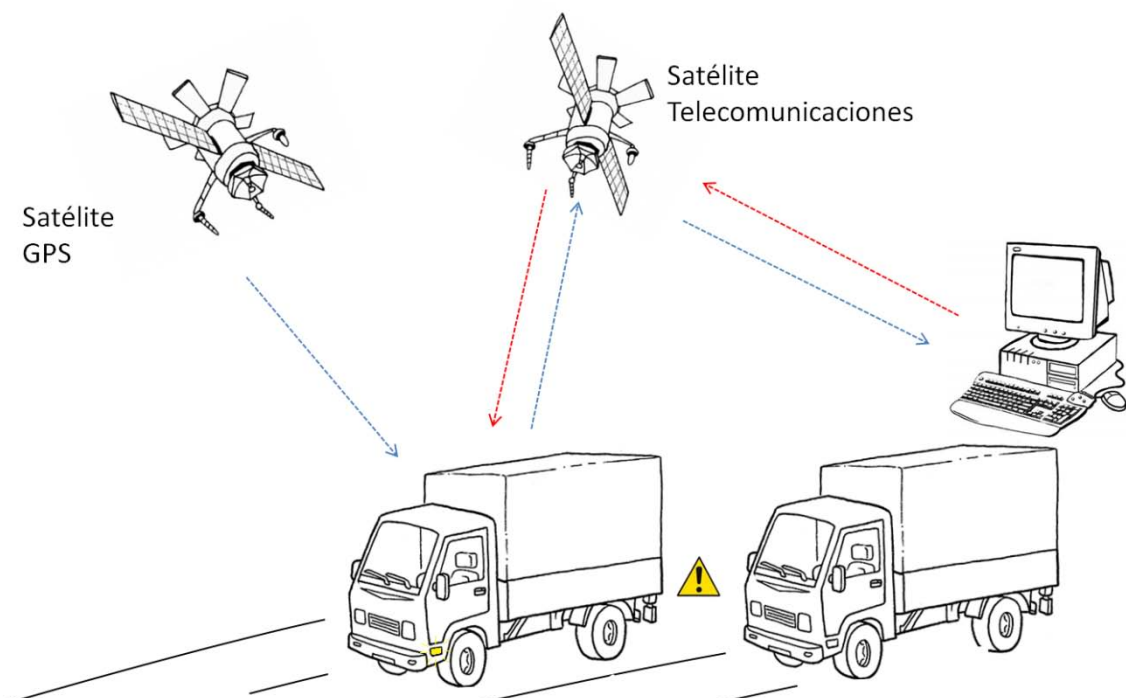
### **3.3.3 Envío de instrucciones al sistema de accionamiento**

Las decisiones del procesador se envían al sistema de accionamiento para que el vehículo realice las maniobras correspondientes mediante impulsos eléctricos. En caso de necesidad de giro se accionará el eje de entrada del volante mediante un motor eléctrico. Si es necesario acelerar se utilizará un sistema de acelerador electrónico similar al de los vehículos equipados con control de velocidad de crucero. Para frenar se pueden utilizar sistemas de accionamiento mecánico del pedal.

### **3.3.4 Actualización del sistema**

Un aspecto imprescindible, en todo hardware y software, es la posibilidad de actualización de éste. Es interesante la posibilidad de añadir actualizaciones periódicas al software suministrado para la implantación de la automatización, para así, corregir errores que se vayan registrando durante el uso del sistema.

La empresa que decida instalarlo en sus camiones tendrá a su disposición un servicio actualización de firmware. El cliente podrá descargar las actualizaciones del software directamente desde el mismo vehículo o si lo prefiere desde un ordenador para realizar las actualizaciones pertinentes a través de éste.

DIAGRAMA DE BLOQUES SIMPLIFICADO DE TOMA DE DECISIONES*Figura 22: Diagrama de bloques general de automatización de vehículos**Figura 23: Ilustración funcionamiento del sistema*



## 3.4 Conclusión

Como se puede observar hay muchas opciones disponibles para automatizar el transporte por carretera. Cada vez, hay más empresas que están interesadas en este campo, por lo que se está impulsando su desarrollo. Sin embargo, actualmente la opción de Google es la más avanzada de todas debido a la inversión realizada por la compañía. Aunque las investigaciones estén siendo enfocadas para automatizar la circulación de los turismos, estos sistemas se pueden aplicar a cualquier tipo de vehículo. Lo más interesante de esta opción es que permite realizar la automatización total del vehículo, frente a las alternativas como SARTRE, que necesitan al menos, que un vehículo sea conducido por una persona.

Otra ventaja del proyecto de Google es que el vehículo es capaz de circular en cualquier tipo de carretera, urbana, autopistas, autovías, carreteras convencionales, etc.

Sin embargo, este sistema está obligado a manejar infinidad de variables y debe responder ante cualquier situación. El inconveniente de esto es que el desarrollo es muy complejo, por lo que la fase de pruebas debe ser mucho más rigurosa. Es decir, la inversión en tiempo y dinero es bastante elevada.

Los inconvenientes del sistema de Google son:

- Actualmente en fase de desarrollo.
- Alto coste de adquisición de equipos y dispositivos.
- Necesidad de una alta capacidad de cómputo del ordenador de a bordo, aunque compensada utilizando la tecnología de *cloud computing*.

Centrándonos en el caso de estudio de este proyecto, es decir, la circulación de vehículos pesados por carriles únicos, las variables que tendría que manejar un vehículo, que tenga implementado el sistema de Google de automatización, son bastante más reducidas que si el vehículo circulase por un entorno urbano. Debido a la simplificación que se produce en las situaciones a las que se tiene que enfrentar el vehículo, la implantación del sistema para que los vehículos circulen basándose en patrones ferroviarios es perfectamente plausible a corto-medio plazo. Con la construcción de carreteras orientadas a la circulación de vehículos automatizados, el sector sufriría un gran impulso, por lo que el desarrollo de la tecnología se aceleraría.

Por tanto, la alternativa seleccionada es la del proyecto de Google.



# **Capítulo 4: Estudio de la viabilidad económica**

## 4.1 Introducción

En este proyecto se evalúa la viabilidad de la construcción de una calzada por la que únicamente circulen vehículos pesados automatizados. En los proyectos de construcción de infraestructuras, se estudia su rentabilidad mediante el cálculo del VAN social y financiero. Como hay que realizar estimaciones, las cuáles son subjetivas al evaluador, se deben introducir una serie de variables aleatorias que recojan la incertidumbre asociada a la estimación, para así, completar el modelo de evaluación. En los siguientes apartados se detallarán las simplificaciones realizadas y las variables aleatorias utilizadas.

El trazado de ésta será paralelo al de la calzada por la que circulan los vehículos ligeros. Con esto se podrá desviar el tráfico de vehículos pesados para eliminar la probabilidad de colisión con cualquier vehículo ligero, que dada la diferencia de masa entre ambos, supone un alto riesgo potencial de muerte para los ocupantes de los vehículos que puedan estar implicados.

Además de esto, se pueden enumerar las siguientes ventajas que resultarían de llevar a separar los vehículos ligeros de los pesados:

1. Aumento de la intensidad de servicio de la vía. Como se explicó en el *Capítulo 2*, la intensidad que una vía es capaz de absorber depende de la proporción de camiones que circulen por ella. Si eliminamos el tráfico de vehículos pesados de la carretera de estudio, tendremos una mayor intensidad de servicio, por lo que mejorará el servicio ofrecido por la vía.

$$I_s = C_{CI} \cdot n \cdot \left(\frac{I}{C}\right)_s \cdot F_c \cdot F_0 \cdot \frac{100}{100 - P_c - P_A + E_c P_c + E_A P_A}$$

Por tanto, desviando el tráfico de camiones a otra carretera, la intensidad de servicio es igual a:

$$I'_s = C_{CI} \cdot n \cdot \left(\frac{I}{C}\right) \cdot F_c \cdot F_0 \cdot \frac{100}{100 - P_A + E_A P_A}$$

Que siempre será superior a la anterior.

2. Al mejorar la comodidad, la conducción es más eficiente, por tanto el consumo de combustible medio disminuye. Con esta disminución la cantidad de contaminantes que se desprenden a la atmósfera disminuye. Al tener una conducción más homogénea el nivel de ruidos generados por el tráfico es menor puesto que se evitan un gran número de aceleraciones necesarias para realizar adelantamientos.



3. Posibilidad de ampliar el máximo de velocidad permitida en las carreteras. Debido a que el tráfico sería más fluido y la conducción más cómoda y segura, la velocidad máxima de circulación permitida podrá ser ampliada. Eliminando el tráfico lento de una vía se consigue disminuir ampliamente la necesidad de los vehículos más rápidos de realizar cambios de carriles para realizar un adelantamiento, y por tanto se reduce el riesgo de accidente que existe en estas maniobras.

Las infraestructuras de transporte de un país son imprescindibles para su crecimiento económico, hay que tener una estrategia clara de inversión y mantenimiento. Los proyectos de inversión en infraestructuras tienen en común: alta inversión inicial, inversión irreversible, alto uso de capital humano e incertidumbre asociada al resultado del proyecto. Por tanto se hace imprescindible un estudio de viabilidad económica para este tipo de proyectos.

El análisis coste-beneficio tiene que tener en cuenta tanto los beneficios y costes sociales como los resultados financieros. Junto al VAN social del proyecto se debe acompañar los resultados financieros correspondientes a las diferentes alternativas de precios. Por tanto, estudiando las diferentes tarifas que se pueden aplicar y su impacto sobre el VAN social y financiero se puede llegar a obtener el equilibrio entre la rentabilidad económica y la viabilidad financiera.

Además se debe realizar un estudio de riesgos desde el principio del análisis ya que normalmente en este tipo de proyectos se tiene un gran optimismo en la predicción de los usuarios de la infraestructura y se subestiman los costes de construcción y de mantenimiento. Hay que tener en cuenta en el análisis el rango de variación que pueden tener tanto la demanda como los costes.

El análisis de coste beneficio evalúa la situación antes de que el proyecto comience a construirse a explotarse. Por tanto que se materialice el beneficio estimado por éste, dependerá mayormente de los contratos y del sistema de incentivos que se utilice. Si esto no se gestiona adecuadamente en su momento puede llevar a que por ejemplo, en la fase de explotación, los costes de mantenimiento de la empresa encargada aumenten considerablemente. Esto puede llevar a que el VAN calculado inicialmente disminuya.

Otro aspecto muy importante a considerar es el impacto ambiental que puede tener el proyecto: niveles de ruido en la zona, contaminación generada, impacto visual, destrucción de fauna y flora local, etc. Esto a veces es muy complejo de cuantificar por lo que es mejor realizar un estudio cualitativo de impacto medioambiental.

Además de lo descrito anteriormente, en el análisis de viabilidad hay que tener en cuenta los impactos negativos y positivos que puede tener el proyecto sobre los diferentes grupos de los que se compone la sociedad; es muy probable que para un determinado grupo sea beneficioso y para otro no.



Para realizar una evaluación económica exenta del mayor número de errores posibles hay que tener en cuenta:

1. El proyecto debe estar claramente definido y se deben valorar las alternativas. Para ello hay que delimitar bien el proyecto que se va a evaluar, ya que en ocasiones un proyecto está incluido en uno o más proyectos, los cuales pueden ser rentables o no.
2. Se debe comparar la situación antes de la ejecución y explotación del proyecto con la que se tendría posteriormente. Lo que se busca en un proyecto es que el precio de transporte de personas y bienes disminuya. Para este fin se invierte en capacidad o nuevas carreteras para así aumentar la productividad.
3. Hay que tener en cuenta que los precios utilizados influyen en la rentabilidad social y financiera. Los aspectos que se tienen que considerar para la elección de la tarifa de uso de infraestructuras son:
  - Si tomamos un nivel de renta y población, el precio determina la cantidad de demanda.
  - La participación privada en la construcción y explotación de los proyectos de infraestructuras dependen del VAN financiero; el cuál a su vez depende de la tarifa de acceso y utilización de la infraestructura.
  - Aunque el proyecto se considere socialmente rentable pero comercialmente deficitario, existe un límite de cantidad de dinero público que se utiliza para financiar este déficit.
4. Se debe incorporar la incertidumbre de costes y demanda. Un proyecto de construcción de infraestructuras suele tener una duración de años. Esto implica la imposibilidad de predecir con precisión la demanda que va a generar y por tanto los beneficios obtenidos. Como ya se comentó anteriormente hay que realizar el análisis de riesgos desde el principio. Los valores de costes y beneficios deben calcularse dentro de un rango utilizando distribuciones de probabilidad y la mejor información disponible.
5. Hay que tener en cuenta las condiciones de mercado en las que se ejecutará el proyecto. Se deben estudiar las restricciones a las que estará sometida la construcción y explotación de la infraestructura: eficiencia respecto a otras infraestructuras.

## 4.2 Metodología de evaluación

Las infraestructuras de transporte (carretera, ferrocarril, puertos y aeropuertos) son imprescindibles para el movimiento de personas y mercancías. Debido a que las redes de transporte en los países desarrollados es muy amplia, el rendimiento de la inversión de capital público en infraestructuras es decreciente, por lo que deben estudiarse de forma más minuciosa las diferentes alternativas y elegir las que tengan una mayor repercusión en el bienestar y ofrezcan un crecimiento económico potencial mayor. Los países del denominado “Tercer Mundo” que invierten en infraestructuras obtienen un impacto mayor sobre la economía ya que las redes de comunicación son muy escasas.

Como el impacto de la construcción de la infraestructura sobre la demanda agregada de la economía es prácticamente común a cualquier otro proyecto de transporte, la evaluación debe dar solución a las dos siguientes problemáticas:

1. Elección de las diferentes alternativas viables
2. Quién debe pagar la construcción y el mantenimiento

Desde el punto de vista técnico los ingenieros decidirán si un proyecto es viable técnicamente y, desde la perspectiva económica, la decisión de construir estará influenciada sobre todo por la disponibilidad de fondos para la construcción, mantenimiento y operación. Además para aceptar un proyecto, los beneficios sociales deben ser superiores a los costes sociales.

### 4.2.1 Valor Actual Neto (VAN)

Para la evaluación de proyectos de inversión, cuyos beneficios y costes están distribuidos a lo largo de un número de periodos en el futuro, se tiene que determinar cuál es el valor actualizado (VAN) de la diferencia entre los beneficios y los costes. Tanto los costes como los beneficios pueden evaluarse desde el punto de vista privado como social. Estos puntos de vista no suelen coincidir en los proyectos de transporte debido a que:

- Los beneficios sociales muestran la valoración por parte de los individuos. Dicha valoración suele ser menor por las empresas ya que éstas sólo valoran los ingresos obtenidos. Sin embargo las empresas pueden recibir subvenciones o ayudas por construir y/o por el mantenimiento de las carreteras por lo que puede darse el caso de que el beneficio social sea inferior al privado. La combinación entre la valoración de la sociedad y los ingresos que obtienen las empresas da lugar a la diferencia entre beneficio social y privado.





- También hay que tener en cuenta los costes sociales y privados. Los costes sociales son aquellos efectos negativos que se den en la sociedad debido a la ejecución del proyecto. Estos costes pueden ser: contaminación ambiental, contaminación acústica, destrucción de paisajes, expropiación de propiedades, etc.

Para realizar la evaluación del proyecto será necesario por tanto calcular el Valor Actual Neto social y el Valor Actual Neto financiero. Las expresiones vendrán dadas por:

$$VAN_s = -I_0 + \sum_{k=1}^n \frac{BS_k - CS_k}{(1+i)^k}$$

*Ecuación 25: Valor Actual Neto Social*

$$VAN_f = -I_0 + \sum_{k=1}^n \frac{IA_k - CP_k}{(1+i)^k}$$

*Ecuación 26: Valor Actual Neto Financiero*

Siendo:

$I_0$ =Inversión inicial

$BS_k$ = Beneficio Social del periodo k

$CS_k$ = Coste Social del periodo k

$IA_k$ = Ingreso Anual del periodo k

$CP_k$ = Coste Privado del periodo k

n= Duración del proyecto

i= Tasa de descuento

Como los beneficios sin actualizar suelen ser mayores a medida que el proyecto empieza a generar resultados, el VAN social y el financiero crecen a lo largo del tiempo. Además el mayor desembolso de capital suele darse cuando se inicia el proyecto. Al tener diferente composición el social del financiero los resultados que se obtienen no son los mismos.

Para poder calcular el valor de dichas expresiones es necesario identificar y estimar los beneficios sociales y costes sociales y privados asociados al proyecto. Esto no siempre resulta sencillo por lo que se tiene que recurrir a la simplificación de la realidad. Una forma de hacerlo es midiendo variaciones en vez de determinar los valores. Hay que buscar el equilibrio entre la simplificación y el rigor necesario para obtener resultados útiles.

En el siguiente gráfico se ilustra el flujo de beneficios sociales y costes típico de un proyecto de infraestructura y su relación con el flujo de caja de las empresas privadas:

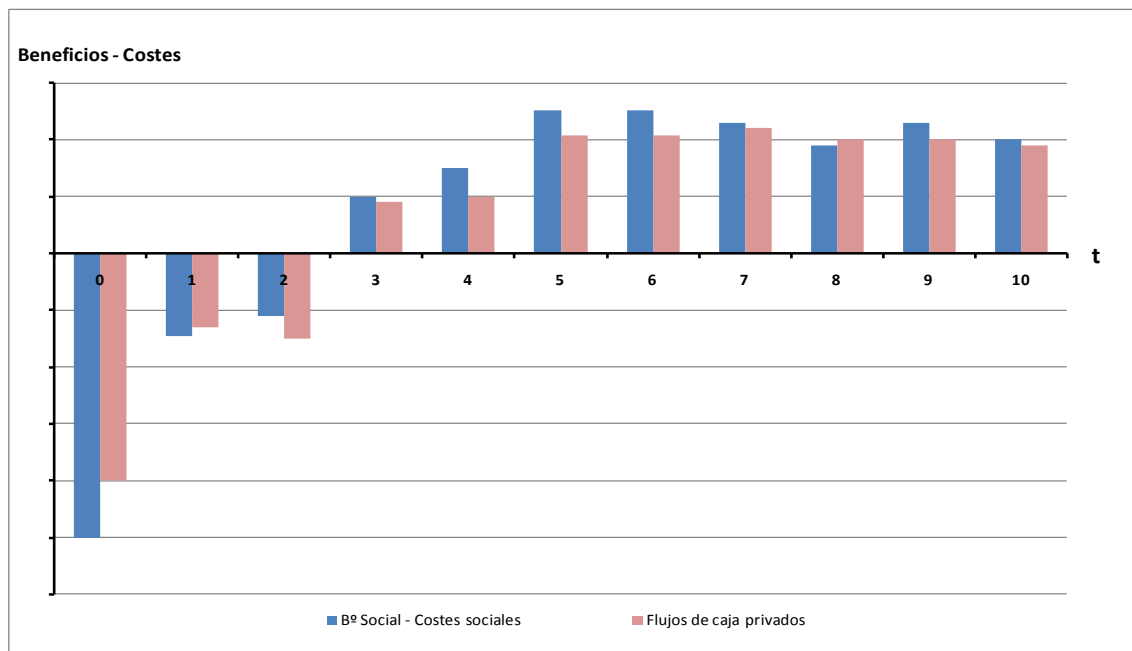


Figura 24: Flujos de Beneficios y Costes típicos de un proyecto

La siguiente figura muestra gráficamente cómo suele evolucionar en el tiempo tanto el VAN social como el VAN financiero. Se puede observar que al principio es cuando se tienen mayores costes debido a la inversión necesaria para ejecutar el proyecto. A medida que pasa el tiempo el beneficio aumenta. Debido a la diferente composición del VAN social y del financiero se tienen diferentes valores de los mismos:

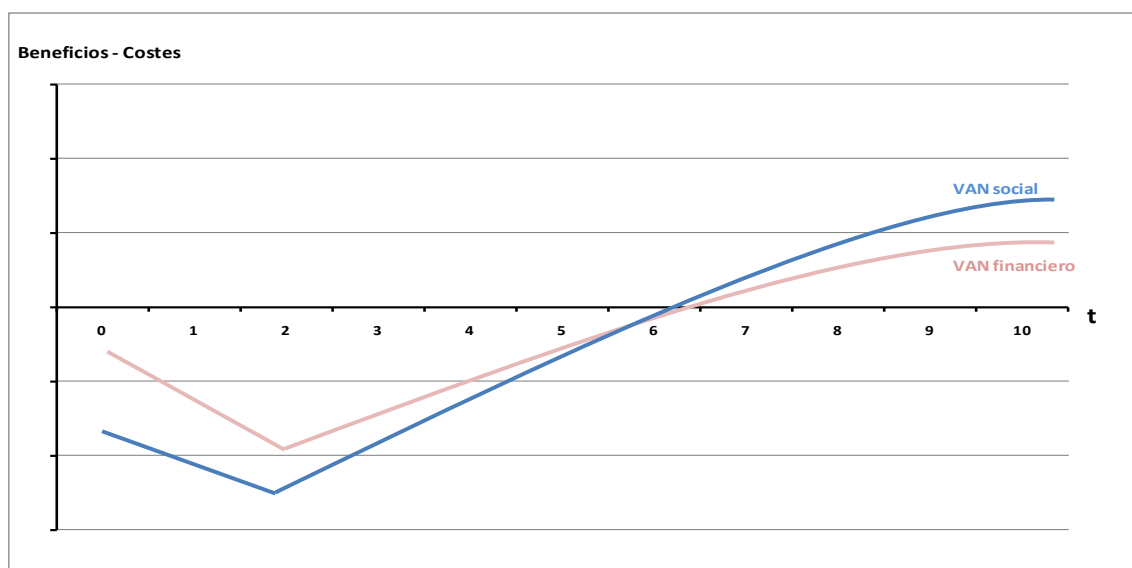


Figura 25: Relación tipo entre VAN social y VAN privado



De forma simplista, los criterios de decisión en ausencia de incertidumbre son los cuatro siguientes:

1.  $VAN_s$  positivo y  $VAN_f$  positivo: Realizar el proyecto
2.  $VAN_s$  positivo y  $VAN_f$  negativo: Si no existen restricciones presupuestarias, el proyecto se realiza. Si existen restricciones habrá que estudiar la forma de modificar los ingresos y costes privados para obtener un VAN financiero positivo.
3.  $VAN_s$  negativo y  $VAN_f$  positivo: No realizar el proyecto
4.  $VAN_s$  negativo y  $VAN_f$  negativo: No realizar el proyecto

#### 4.2.2 Relación entre el VAN social y el VAN financiero

Normalmente el VAN social y el VAN financiero no son iguales, esto se debe a que cada uno representa formas distintas de estudiar la evaluación.

La diferencia entre ambos puede deberse a:

- El precio de mercado utilizado en el análisis financiero no coincide siempre con el coste de oportunidad social.
- Normalmente en el análisis financiero no se tiene en cuenta el impacto que ocasiona el proyecto fuera de los límites del mercado primario analizado. Por ejemplo: Al construir una carretera entre dos puntos, si dichos puntos están comunicados por una línea ferroviaria, la demanda de transporte por tren lo más probable es que disminuya.
- En el análisis social se incluyen los beneficios de todos los individuos afectados por el proyecto, sean usuarios o no. Sin embargo, en el análisis financiero sólo se tienen en cuenta los que se generan en la infraestructura que se ha de construir.

#### 4.2.3 Flujo de beneficios y costes en el VAN

Al realizar el cálculo del VAN, los beneficios y los costes se expresan en magnitudes correspondientes a diferentes momentos del tiempo. Sin embargo el valor del VAN puede verse afectado como consecuencia de la inflación. Es indiferente trabajar con los datos expresados en unidades monetarias constantes o corrientes. Como lo que interesa es la utilización de los recursos disponibles y la generación de beneficios, la inflación normalmente no se toma en cuenta. Es decir, el VAN se expresa en unidades monetarias constantes del año base.

Sin embargo hay dos casos en los que podría ser preferible estudiar el proyecto utilizando unidades monetarias corrientes:

- Cuando todos los datos originales reflejan cambios reales e inflación.



- Infraestructuras en las que los usuarios pagan por su uso y en las que el sector privado participa como gestor o concesionario.

Al tener en cuenta la inflación desde el principio del proyecto, puede ocurrir que la inflación de algunas partidas sea inferior o superior a lo previsto inicialmente. Si esto llegase a suceder, habría que contabilizar la diferencia.

La relación de equivalencia entre el VAN en términos reales y el VAN en términos nominales viene determinada por la siguiente igualdad:

$$\sum_{k=1}^n \frac{BS_k - CS_k}{(1+i)^k} = \sum_{k=1}^n \frac{(BS_k - CS_k)(1+m)^t}{(1+i_n)^k}$$

*Ecuación 27: Relación entre VAN real y VAN nominal*

Siendo:

m=Tasa de inflación anual

i= Tasa de descuento real

i<sub>n</sub>= Tasa de descuento nominal

A partir de la anterior expresión se puede calcular el valor real de la tasa de descuento real y la nominal:

$$\frac{1}{1+i} = \frac{1+m}{1+i_n}$$

*Ecuación 28: Equivalencia entre términos reales y nominales*

Por tanto la tasa de descuento real será igual a:

$$i = \frac{i_n - m}{1 + m}$$

*Ecuación 29: Tasa de descuento real*

Despejando la tasa de descuento nominal:

$$i_n = i + m + im$$

*Ecuación 30: Tasa de descuento nominal*



#### 4.2.4 Medición de beneficios y costes

Los principales beneficios en proyectos de transporte son:

1. Reducción del tiempo de viaje.
2. Mejoras de calidad o fiabilidad de las infraestructuras de transporte
3. Reducción de accidentes y pérdida de vidas
4. Ahorros en los costes operativos y de mantenimiento de la infraestructura.

Principales costes en proyectos de transporte:

1. Externalidades negativas
2. Costes de inversión
3. Variación en los costes de explotación y mantenimiento

##### 4.2.4.1 Fundamentos de la medición de beneficios y costes sociales

Se pueden usar los siguientes métodos para estimar el beneficio social que genera la ejecución de un proyecto:

1. Calcular la suma de los beneficios obtenidos por los distintos grupos sociales afectados por el proyecto. Para cada grupo social se calcula la diferencia entre lo que gana y lo que pierde, estimando lo que están dispuestos a pagar por el proyecto.
2. Calcular los cambios en la disposición a pagar en la utilización de recursos por parte de los implicados en el proyecto (usuarios, empresas privadas, organismos públicos, etc.). Con este método no hay que tener en cuenta los cambios en los excedentes de los grupos afectados. Hay que estudiar si el coste de los recursos utilizados varía si se ejecuta el proyecto o no.

#### PRECIO GENERALIZADO

El precio generalizado de la utilización diaria de un servicio de transporte viene dado por la siguiente expresión:

$$P = Imp + z + vt$$

*Ecuación 31: Precio generalizado*

Siendo:

Imp: Importe (peaje, billete, etc.)

z: Coste variable medio de la utilización del vehículo por parte del usuario.

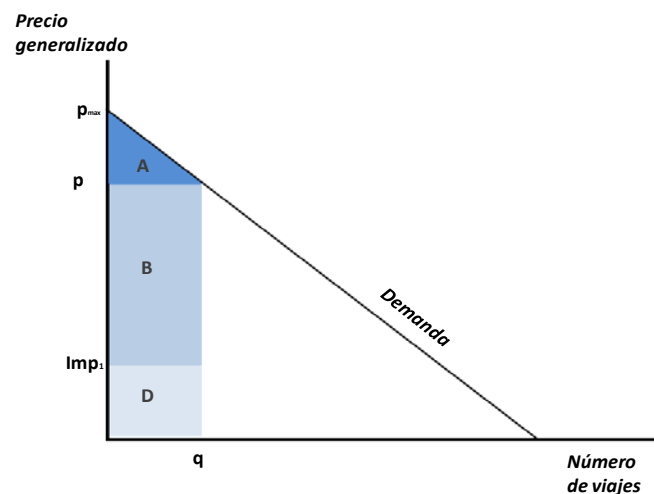
v: Valor unitario del tiempo de viaje en términos monetarios

t: Tiempo invertido en realizar el trayecto

En este apartado, por simplificación, se realizará la evaluación suponiendo que los componentes monetarios del precio no se ven afectados por el proyecto de transporte evaluado. Es decir, sólo se supondrá que se reduce el tiempo total de viaje y que permanece constante el precio monetario del mismo. En el siguiente apartado se estudiará el caso general, es decir, que además de disminuir el tiempo total de viaje, el precio monetario aumente.

La demanda de utilización de la infraestructura es inversamente proporcional al precio generalizado. Es decir, al aumentar  $P$  la demanda disminuye y viceversa, por lo que habrá un precio generalizado máximo que el usuario estará dispuesto a pagar por el uso de la infraestructura.

En la siguiente figura se representa el precio generalizado frente a la demanda. Por simplificar la representación, no se ha tenido en cuenta el coste de la construcción de la carretera ni las subvenciones e impuestos:



*Figura 26: Beneficios sociales de un proyecto de transporte*

Como se observa en la figura, el usuario paga un importe “Imp” por el uso de la autopista, pero el precio por el uso de ésta es igual a  $p$ , que es el precio generalizado. Si simplificamos la expresión de  $p$ , suponiendo  $z$  despreciable, la zona B corresponde al valor monetario del tiempo total de viaje ( $vt$ ). El área A es el excedente de los usuarios, por lo que es el beneficio social de ejecutar el proyecto. La zona D son los ingresos que obtienen las empresas por la explotación, por lo que será el valor de los ingresos privados. Por tanto, el beneficio neto será igual a la suma de las áreas  $A+D$ , restando los costes de construcción C.

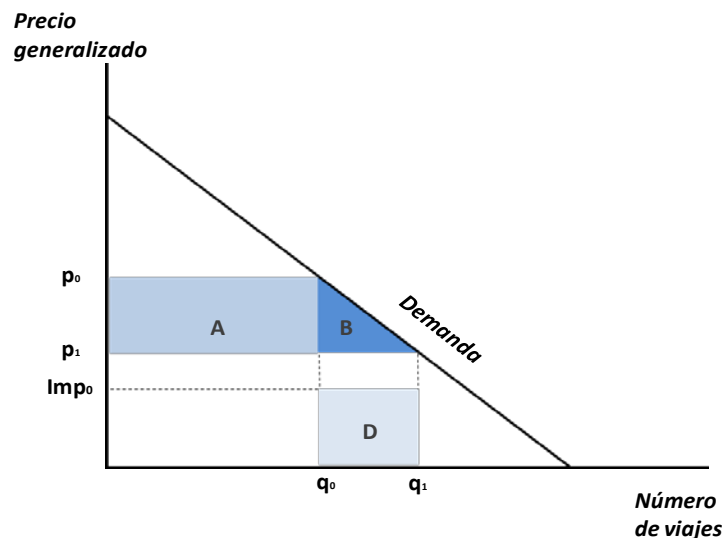
Si se estima el valor máximo del precio que está dispuesto a pagar el usuario se puede aproximar la siguiente expresión analítica del Beneficio Neto:

$$B_{neto} = \frac{1}{2}(p_{m\acute{a}x} - p)q + (Imp)pq - C_1$$

*Ecuación 32: Beneficio Neto de un proyecto*

Se ha de suponer que el precio generalizado debido a la construcción de la infraestructura disminuye en relación a si no se lleva a cabo el proyecto.

En el caso de que el proyecto conlleve una modificación del precio generalizado ya existente (al mejorar una infraestructura o al introducir servicios existiendo otras alternativas) y que el importe por utilizar la nueva infraestructura no aumente, se tendría la siguiente gráfica:



*Figura 27: Beneficios Sociales de un Proyecto con alternativas de transporte existentes*

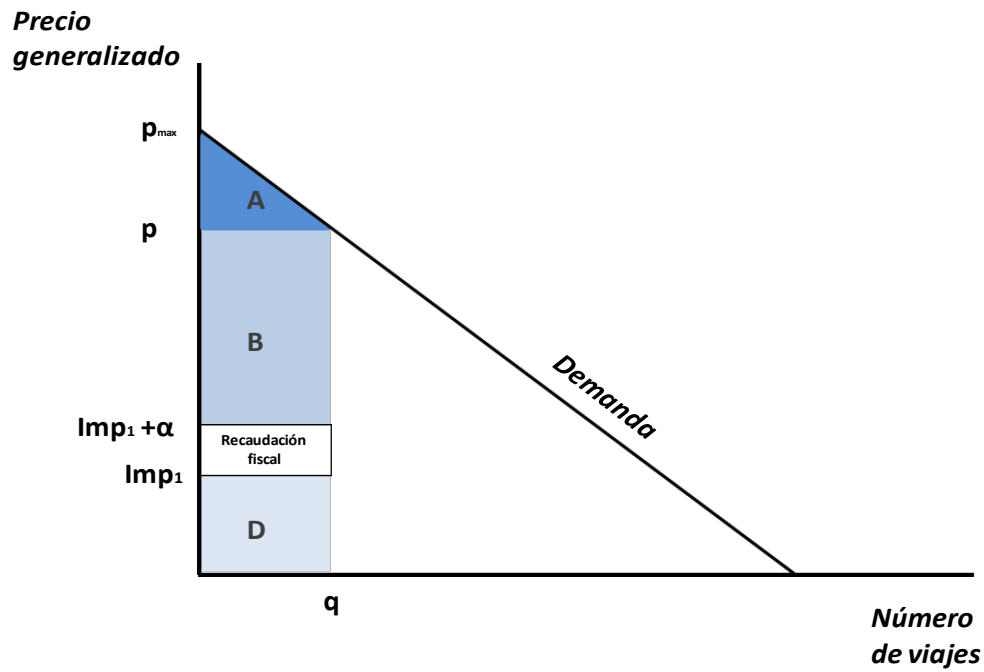
Como se puede observar en la figura, el proyecto reduce el precio generalizado de  $p_0$  a  $p_1$ , debido a una disminución del tiempo de viaje sin que exista ningún cambio en los componentes monetarios ( $Imp$  o  $z$ ). Con esta reducción, la demanda de viajes aumentaría de  $q_0$  a  $q_1$ .

En esta situación el beneficio neto es más fácil de calcular ya que sólo hace falta calcular el incremento en los excedentes de los consumidores ( $A+B$ ) y del sector privado ( $D$ ). Es decir, hay que sumar las áreas  $A+B+D$  y restar la variación de los costes.

$$B_{neto} = \frac{1}{2}(p_0 - p_1)(q_0 + q_1) + (Imp)(q_1 - q_0) - (C_1 - C_0)$$

*Ecuación 33: Beneficio Neto con alternativas de transporte existentes*

Considerando ahora los impuestos, el beneficio neto se ve modificado. El precio de viaje unitario se incrementa de tal manera que el importe que paga el usuario es igual a  $\text{Imp}' = \text{Imp} + \alpha$ . Siendo  $\alpha$  el impuesto unitario. De esta manera el beneficio social al existir un impuesto unitario de un proyecto en el que no existen alternativas de transporte será igual a:



*Ecuación 34: Beneficios sociales de un proyecto de transporte*

Por tanto el Beneficio Neto sería igual a:

$$B_{\text{neto}} = \frac{1}{2}(p_{\text{máx}} - p)q + (\text{Imp})q + \alpha q - C_1$$

*Ecuación 35: Beneficio Neto de un proyecto incluyendo impuestos*

Si el importe pagado por el usuario incluye también subvenciones tendríamos  $\text{Imp}' = \text{Imp} + \alpha - s$ , siendo  $s$  el valor de la subvención unitaria. Por tanto la expresión anterior quedaría:

$$B_{\text{neto}} = \frac{1}{2}(p_{\text{máx}} - p)q + (\text{Imp})q + \alpha q - sq - C_1$$

*Ecuación 36: Beneficio Neto de un proyecto incluyendo impuestos y subvenciones*

Agrupando términos se obtiene:

$$B_{\text{neto}} = \frac{1}{2}(p_{\text{máx}} - p)q + (\text{Imp} + \alpha - s)q - C_1$$



De la misma manera, en el caso de que existan alternativas de transporte a la del proyecto, si incluimos los impuestos se obtiene:

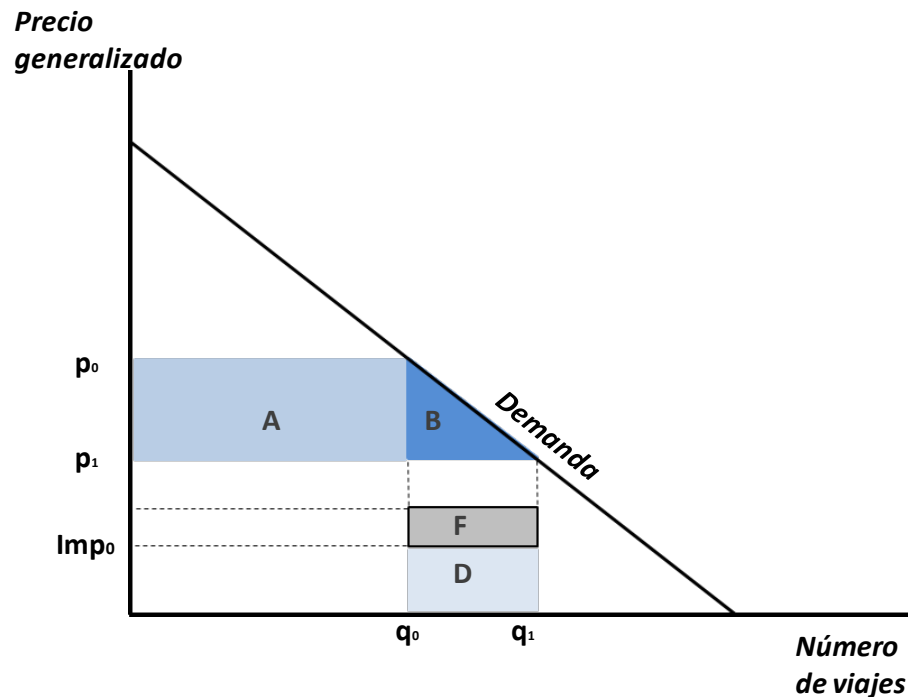


Figura 28: Variación del precio generalizado

La zona F corresponde a la variación de la recaudación fiscal debido al uso de la infraestructura por parte de los usuarios. Dicha variación es igual a  $(p_1 - \text{Imp}) \cdot (q_1 - q_0)$ . Además, incluyendo la subvención unitaria del importe de usos  $(q_1 - q_0)$ , se obtiene la siguiente expresión:

$$B_{\text{neto}} = \frac{1}{2}(p_0 - p_1)(q_0 + q_1) + (\text{Imp})(q_1 - q_0) + \alpha(q_1 - q_0) - s(q_1 - q_0) - (C_1 - C_0)$$

Ecuación 37: Beneficio Neto incluyendo impuestos y alternativas de transporte

Agrupando términos se obtiene:

$$B_{\text{neto}} = \frac{1}{2}(p_0 - p_1)(q_0 + q_1) + (\text{Imp} + \alpha - s)(q_1 - q_0) - (C_1 - C_0)$$

Ahora, además de considerar los impuestos y las subvenciones, se tendrán en cuenta el efecto de las externalidades en la medición de los beneficios sociales. Suponiendo que existe un efecto externo negativo, cuyo coste unitario  $\epsilon$  es constante, se tiene:

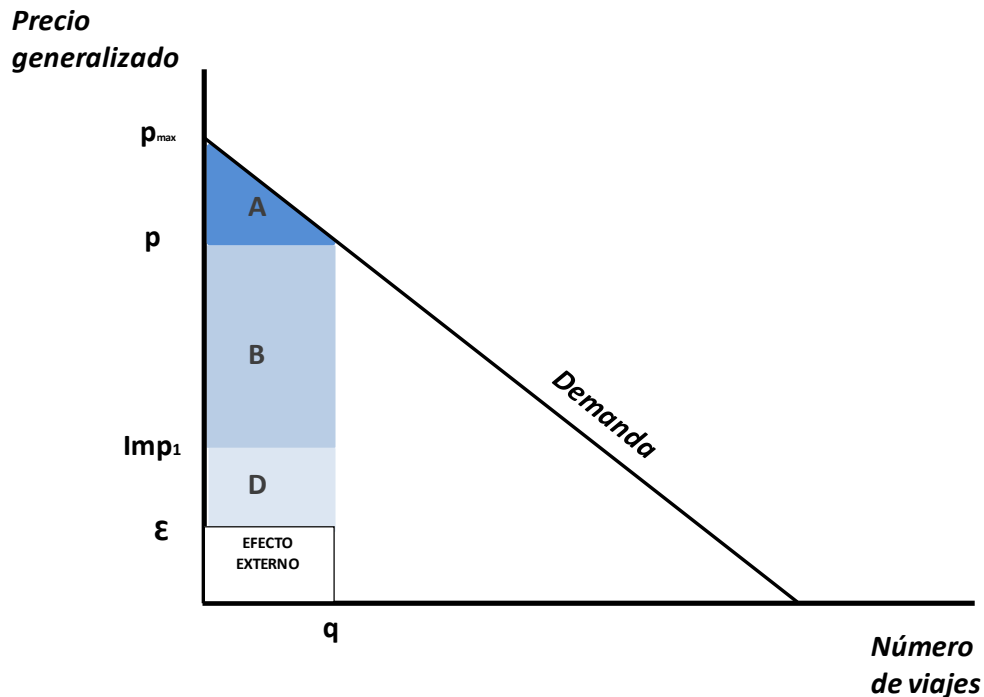


Figura 29: Beneficio social considerando externalidades negativas

El coste total de la externalidad viene definido por el área  $\epsilon q$ . Este coste hay que restárselo a la expresión 36 obteniendo la siguiente:

$$B_{neto} = \frac{1}{2}(p_{m\acute{a}x} - p)q + (Imp)q + \alpha q - sq - \epsilon q - C_1$$

Agrupando términos se obtiene:

$$B_{neto} = \frac{1}{2}(p_{m\acute{a}x} - p)q + (Imp + \alpha - s - \epsilon)q - C_1$$

Ecuación 38: Beneficio social considerando externalidades

Con la siguiente figura se puede considerar el papel de las externalidades en la medición de los beneficios sociales en su versión más simple, cuando existen alternativas al proyecto.

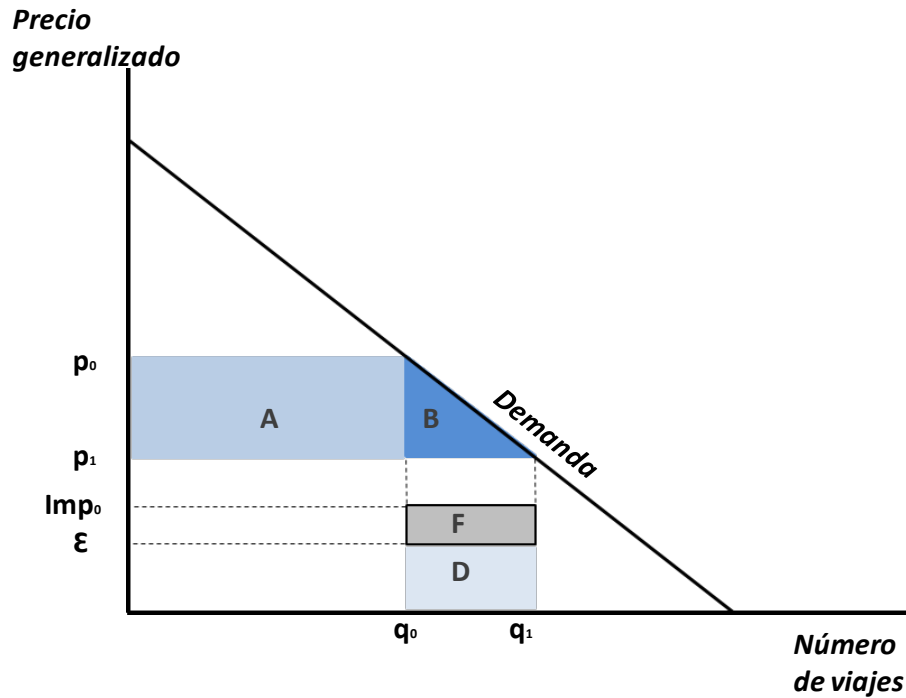


Figura 30: Beneficio Social considerando externalidades y alternativas de transporte

El área D representa la variación del coste de la externalidad soportado por el tráfico generado. Añadiendo éste valor a la expresión 37 se obtiene:

$$B_{neto} = \frac{1}{2}(p_0 - p_1)(q_0 + q_1) + (Imp)(q_1 - q_0) + \alpha(q_1 - q_0) - s(q_1 - q_0) - \varepsilon(q_1 - q_0) - (C_1 - C_0)$$

Agrupando términos:

$$B_{neto} = \frac{1}{2}(p_0 - p_1)(q_0 + q_1) + (Imp + \alpha - s - \varepsilon)(q_1 - q_0) - (C_1 - C_0)$$

Ecuación 39: Beneficio social incluyendo externalidades y alternativas de transporte

#### 4.2.4.2 Medición de beneficios sociales. Caso general

En el apartado anterior, como ya se comentó, para simplificar se supuso que los componentes monetarios del precio generalizado no se ven afectados por el proyecto de transporte que se esté evaluando. Ahora se tendrá en cuenta la variación de estos en la evaluación.

Considerando el caso de la construcción de una carretera que reduce la distancia y el tiempo invertido en recorrer la distancia que separa a dos puntos. Se reduce además los costes operativos del vehículo de  $z_0$  a  $z_1$ . Para circular por la nueva carretera, los usuarios tienen que pagar un importe de peaje mayor al que se cobraba anteriormente (de  $Imp_0$  a  $Imp_1$ ,  $Imp_1 > Imp_0$ ).

La carretera que antes unía los dos puntos sigue operativa, por tanto los conductores tienen alternativas de elección. Si estos deciden realizar el trayecto por la carretera construida, significará que su utilidad es mayor que la de la antigua vía, es decir, que su precio generalizado es menor ( $P_1 < P_0$ ), esto es:

$$P_0 = Imp_0 + z_0 + vt_0$$

$$P_1 = Imp_1 + z_1 + vt_1$$

$$Imp_1 + z_1 + vt_1 < Imp_0 + z_0 + vt_0 \Rightarrow Imp_1 - Imp_0 < z_0 - z_1 + v(t_0 - t_1)$$

Gráficamente:

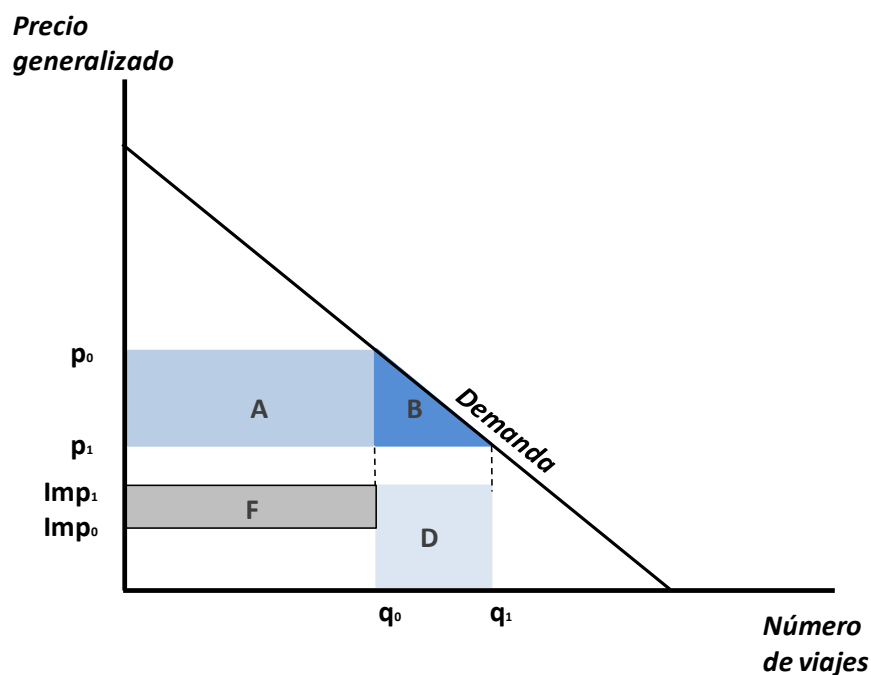


Figura 31: Caso general de medición de Beneficios sociales

Como se observa en la figura, el precio generalizado disminuye de  $p_0$  a  $p_1$ , por lo que la demanda de viajes aumenta de  $q_0$  a  $q_1$ . La variación producida en el excedente de los usuarios es igual a la suma de las áreas A y B:

$$\Delta EC = \frac{1}{2}(p_0 - p_1)(q_0 + q_1)$$

*Ecuación 40 : Excedente de los usuarios. Caso general*

La variación de los excedentes de los productores será igual a la suma de las áreas F y D restando la variación de los costes:

$$\Delta EP = Imp_1 q_1 - Imp_0 q_0 - (C_1 - C_0)$$

*Ecuación 41: Excedente de los productores. Caso general*

Por tanto el beneficio social neto será igual a la suma de los excedentes anteriores (sin tener en cuenta la inversión inicial):

$$BN_s = \Delta EC + \Delta EP = \frac{1}{2}(p_0 - p_1)(q_0 + q_1) Imp_1 q_1 - Imp_0 q_0 - (C_1 - C_0)$$

*Ecuación 42: Beneficio Social Neto anual. Caso general*

Como la demanda puede cambiar con el paso del tiempo, esta expresión habría que recalcularla anualmente.

Introduciendo esta expresión en la ecuación 1 se obtiene:

$$VAN_s = -I_0 + \sum_{k=1}^n \frac{\Delta EC_k + \Delta EP_k}{(1+i)^k}$$

*Ecuación 43: VAN Social. Caso general*

Donde:

$$\Delta EC = \frac{1}{2}(p_0 - p_1)(q_0 + q_1)$$

$$\Delta EP = Imp_1 q_1 - Imp_0 q_0 - (C_1 - C_0)$$

Si ahora se tiene en cuenta los impuestos y los efectos externos negativo, tal como se explicó en el modelo básico del apartado 4.2.4.1, la expresión del VAN social es entonces:

$$VAN_s = -I_0 + \sum_{k=1}^n \frac{\Delta EC_k + \Delta EP_k + \alpha_{1k} q_{1k} - \alpha_{0k} q_{0k} - \varepsilon_{1k} q_{1k} + \varepsilon_{0k} q_{0k}}{(1+i)^k}$$

*Ecuación 44: VAN Social incluyendo impuestos y externalidades. Caso general*



Este modelo de evaluación permite reflejar los efectos de la inversión en proyectos de transporte sobre la asignación de recursos cuando se dan los supuestos siguientes:

- Los únicos beneficios son los derivados de ahorros de tiempo por trasvase de tráfico desde la carretera antigua a la de estudio, más el valor del nuevo tráfico generado y los cambios en costes variables de vehículos e infraestructura.
- Existen fondos públicos disponibles y por tanto no hay que corregir la inversión inicial con el precio sombra de los fondos públicos que se destinan a la construcción del puente.
- Si  $VANs > 0$  condición suficiente para invertir en el proyecto, lo que no ocurriría si hubiese varios proyectos compitiendo por fondos públicos escasos, en cuyo caso un VAN social positivo sería condición necesaria pero no suficiente.

#### **4.2.4.3 Análisis de demanda y costes con y sin proyecto**

Como se ha explicado en los puntos anteriores, la mayor parte de los proyectos de transporte aportan a la sociedad dos tipos de beneficios principales, estos son: una reducción del tiempo de viaje (personas o mercancías) y un aumento en la disposición a pagar correspondiente a los nuevos viajes que se realizan tras el proyecto. Con el transcurso del tiempo estos beneficios dependerán de los efectos que genere el proyecto, pero en su evaluación hay que considerar la comparación entre lo que habrá sucedido si el proyecto se hubiese realizado y el caso contrario. Dependiendo del tipo de proyecto, otros beneficios se sumarán a los anteriores, como por ejemplo las mejoras en la fiabilidad y seguridad, reducción en la generación de la contaminación, etc.

Se puede partir del planteamiento general en la evaluación preguntando qué se gana y que se pierde tras la realización del proyecto, para así, medir los beneficios sociales con el proyecto (situación 1) frente al caso sin proyecto (situación 0).

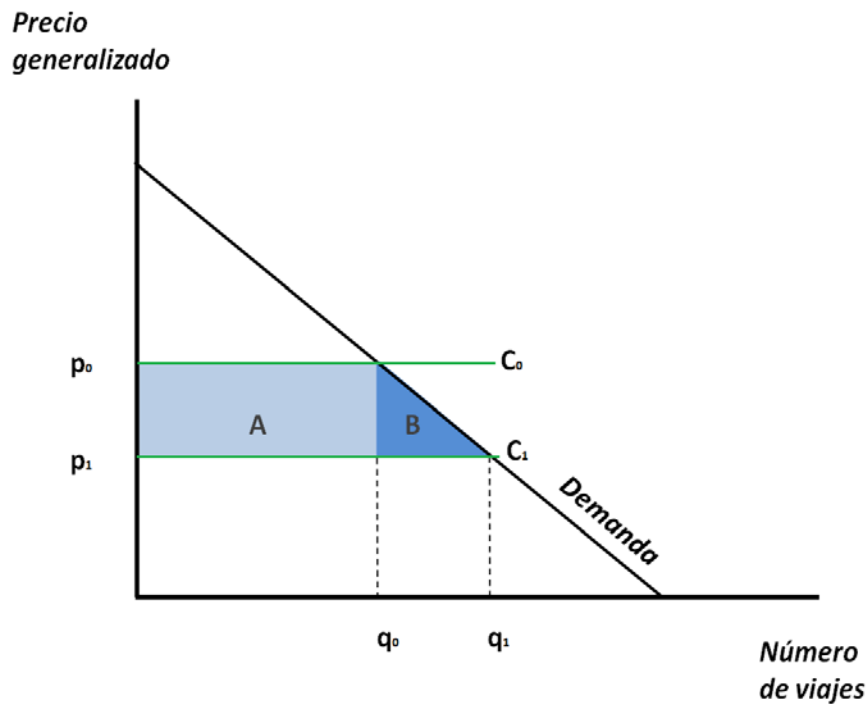
Un proyecto consistente en la construcción de una nueva infraestructura que reduzca el tiempo de transporte, tendrá como resultado una reducción del precio generalizado de  $P^0$  a  $P^1$ . Para simplificar el análisis, se toma como hipótesis que no hay precio monetario, ni costes operativos del equipo móvil, ni impuestos, ni externalidades, ni efectos indirectos, por lo que el precio generalizado es igual a el valor del tiempo de viaje  $v\tau$ .

Si la demanda fuese perfectamente inelástica y los costes unitarios no cambiasen al hacerlo la demanda, los beneficios iniciales del proyecto se obtendrían multiplicando la reducción del tiempo de viaje por su valor y por el número de viajes realizados.

En los años siguientes podría pensarse que a medida que la demanda creciese, el beneficio también se vería incrementado en la misma cuantía que la demanda. Sin embargo

esto no es así, ya que la demanda responde a cambios en los precios generalizados y los costes no suelen ser constantes.

En la próxima figura se representa los beneficios iniciales del proyecto suponiendo que los costes medios de transporte con y sin proyecto son constantes e iguales al precio generalizado.



*Figura 32: Beneficios iniciales del proyecto*

Para conocer los beneficios sociales se necesita conocer la reducción del precio generalizado y el incremento del tráfico resultante de esta reducción.

Los beneficios sociales del proyecto asociados al tráfico ya existente serían igual al área A, es decir:

$$BN_s = v \cdot (\tau_0 - \tau_1) \cdot q_0$$

En el caso del tráfico generado, los beneficios sociales vienen dados por el área B, es decir:

$$BN_s = \frac{1}{2} v \cdot (\tau_0 - \tau_1) \cdot (q_1 - q_0)$$

Por tanto, los beneficios iniciales del proyecto asociados al tráfico existente, desviado y generado, corresponden a la suma de las áreas A y B:

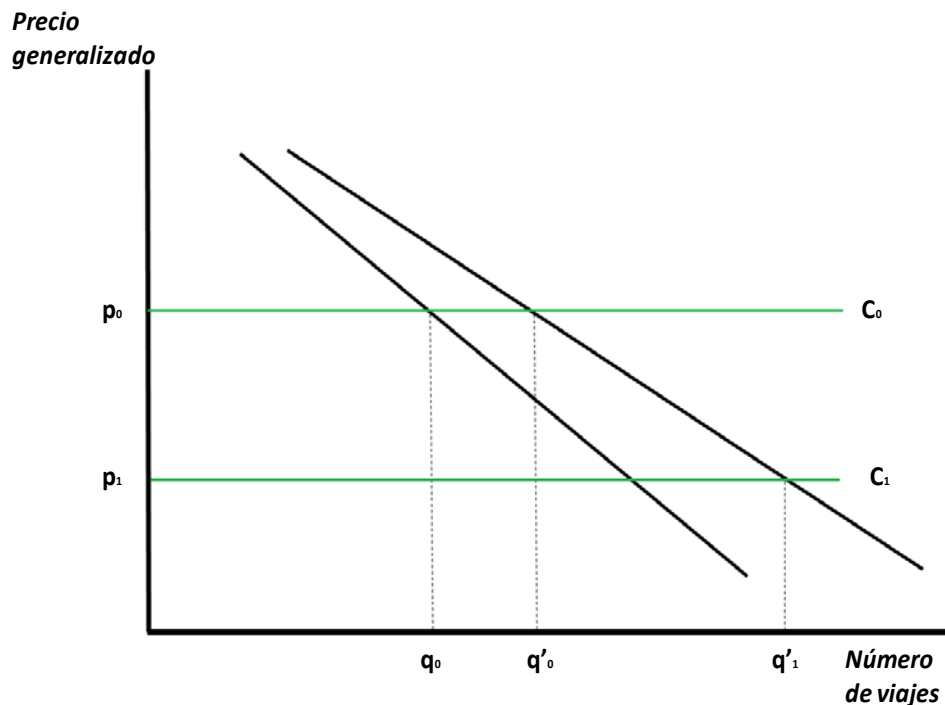
$$BN_s = \frac{1}{2} v \cdot (\tau_0 - \tau_1) \cdot (q_1 + q_0)$$

*Ecuación 45: Beneficio social del proyecto asociado al tráfico desviado y generado*

Donde el tráfico generado puede estimarse a partir de la elasticidad de la demanda  $\eta$  con respecto al precio generalizado en el punto de equilibrio inicial:

$$q_1 = q_0 \cdot \left( 1 + \eta \cdot \frac{\Delta p}{p} \right)$$

En la próxima figura se representa un año más tarde la función de la demanda, la cual ha aumentado respecto al año anterior.



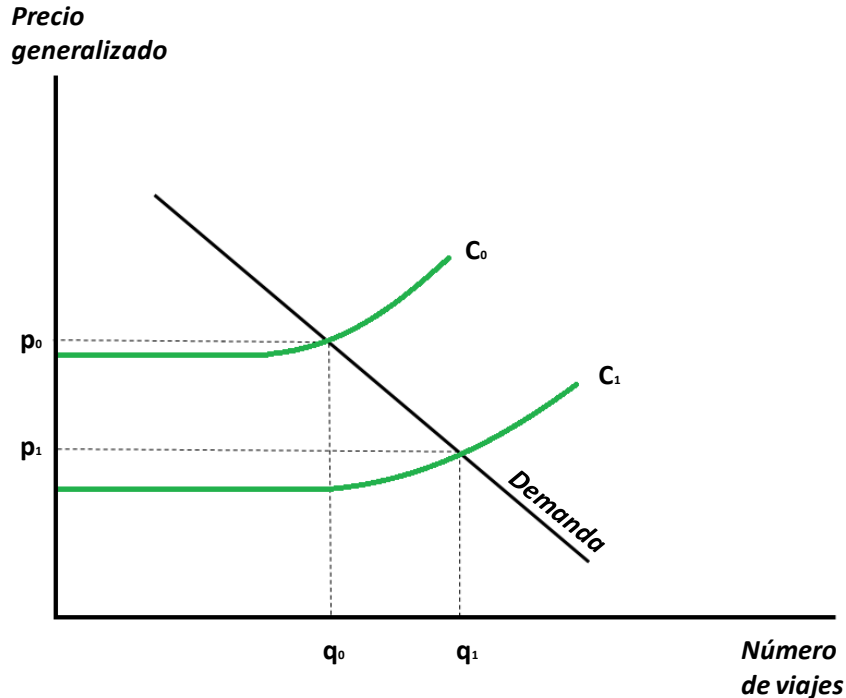
*Figura 33: Beneficios del proyecto y cambios en la demanda en el año t+1*

La nueva función de la demanda afecta tanto al tráfico con proyecto como al que habría habido si el proyecto no se hubiese realizado. Los valores que hay que comparar son pues  $q'_0$  y  $q'_1$ , ya que son los correspondientes al año t+1. En los años sucesivos habrá de realizarse lo mismo, es decir comparar los valores de la demanda para cada situación en dicho año.

Hasta ahora no se había considerado el cambio de los costes en función del crecimiento de la demanda. Un caso más realista es el que se ilustra en la siguiente figura, ya que se tiene en cuenta la variación del coste medio de los viajeros en función del crecimiento de la demanda. Un aumento en el coste social se puede deber a que, al aumentar la demanda el tiempo de viaje puede aumentar debido a las congestiones que se producen en la carretera.

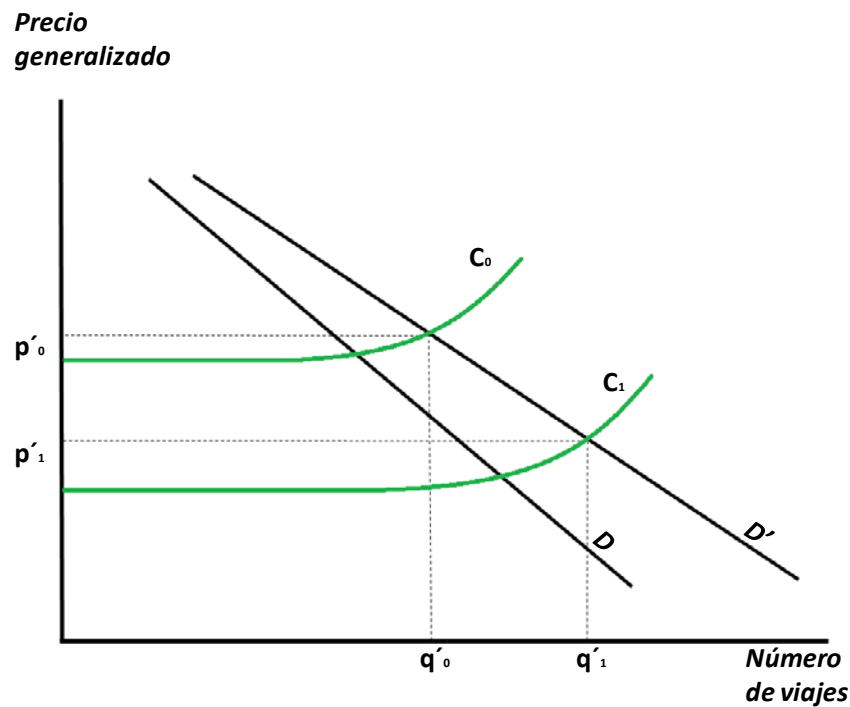


Aunque el proyecto consiga inicialmente una mayor reducción en el precio generalizado de los viajes, el consiguiente aumento de la demanda produce más congestión, haciendo que el precio final sea superior al que cabría esperar inicialmente.



*Figura 34: Beneficios del proyecto con cambios en los costes*

La reducción de los costes sería máxima sólo en el caso de que la demanda fuese perfectamente inelástica. De hecho, cuanto más elástica es la demanda respecto al precio, menor es la reducción en el precio generalizado.



*Figura 35: Beneficios y cambios en los costes en el año  $t+1$*

Como se observa en la figura anterior, para calcular los beneficios en los años sucesivos será necesario determinar los equilibrios con y sin proyecto en los periodos siguientes. En dicha figura está reflejado el crecimiento de la demanda  $D'$  en el periodo  $t+1$ , mostrando la variación en los costes y que ésta afecta de manera determinante al cálculo de los beneficios sociales.

Finalmente, cuando el precio generalizado incluye un precio monetario los equilibrios cambian, pero no la manera de calcularlos hasta ahora. Tanto si el precio monetario está calculado para igualar el precio generalizado al coste marginal como si se trata de una tasa por utilización de una infraestructura para recuperar los costes fijos, el procedimiento de estimación de los beneficios no varía.

## 4.3 Incertidumbre y criterios de decisión

### 4.3.1 La incertidumbre en los proyectos de transporte

La forma de evaluación de proyectos hasta ahora tiene carácter determinista. Las variables toman valores únicos que se conocen con certeza una vez fijadas las condiciones y los parámetros de la obra y el volumen de la demanda que se va a atender. Sin embargo existe un conjunto de factores que hacen que el VAN calculado antes del proyecto y el que se tiene después puedan diferir.

La incertidumbre se puede definir como la existencia de diferentes resultados posibles que puede dar un proyecto y cuya ocurrencia depende de diferentes hechos que pueden darse durante la vida del mismo. La falta de certeza sobre el resultado de un proyecto depende de dos tipos de incertidumbre cuya presencia amplía el rango de valores que pueda tener el VAN:

1. Existencia de contingencias diferentes cuya ocurrencia afecta al flujo de beneficios y costes, como por ejemplo, que los precios de los inputs crezcan a una tasa menor o mayor de la esperada. Esta incertidumbre puede ser específica del proyecto o externas al mismo (elevación de los precios del petróleo).
2. Hay una incertidumbre asociada al proceso de evaluación y que puede darse incluso si no se diese ningún caso de incertidumbre como la anteriormente descrita. Se trata de la información disponible sobre el valor del tiempo o las elasticidades de la demanda con respecto al precio y a la renta. Desde el momento en que se utilicen varios valores para el precio de los inputs o el valor del tiempo, el efecto sobre el VAN es idéntico al de la incertidumbre de demanda.

Junto a los factores exógenos al proyecto, los factores humanos pueden dar lugar a que un proyecto no se ajuste a lo esperado. A veces se cometen errores en la predicción de la demanda, en el diseño de la obra o en la confección del presupuesto del proyecto. La diferencia que estos errores introduce en el proyecto no debería tener una dirección determinada si estos tuviesen naturaleza aleatoria.

Es muy frecuente que la demanda se sobre-estime y que los costes se subestimen, es decir, dicha diferencia suele ser sistemático a favor del proyecto. Estudiando la expresión antes descrita del VAN, se observa que se puede introducir la incertidumbre de tres formas distintas en la evaluación económica.

1. Incertidumbre sobre los precios de inversión. Puede darse la aparición de retrasos que afecten a la variación en las obras y/o desviaciones no previstas de los costes reales con respecto a los presupuestados. Suele ser complicado conocer con exactitud el consumo de determinados inputs como la energía y los materiales. También pueden aparecer desviaciones en el precio de dichos factores.



2. Incertidumbre procedente del cómputo de los beneficios. Es difícil prever correctamente la demanda futura de tránsito de vehículos en una carretera. También es complicado conocer la elasticidad de la demanda respecto a la renta y al precio.
3. El último tipo de incertidumbre es de tipo metodológico, se debe a la dificultad de predecir con certeza los equilibrios con y sin proyecto y al propio cómputo de determinados factores, como el valor del tiempo o el coste de los accidentes.

$$VAN_s = -I_0 + \sum_{k=1}^n \frac{BS_k - CS_k}{(1+i)^k}$$

- **Incertidumbre sobre la inversión ( $I_0$ ):** duración de las obras, costes reales vs previstos.
- **Incertidumbre sobre la demanda ( $BS_k$ ):** elasticidad precio, elasticidad renta, crecimiento de la renta.
- **Incertidumbre sobre el consumo de los inputs ( $CS_k$ ):** unidades físicas de trabajo, materiales, energía, etc.
- **Incertidumbre sobre el precio de los inputs ( $CS_k$ ):** salarios, variaciones exógenas a los costes, etc.

Cada una de estas fuentes tiene un impacto diferente sobre los posibles valores finales del VAN en un proyecto. Ante la imposibilidad de conocer todas y cada una de las variables aleatorias implicadas en un proyecto, resulta imprescindible seguir un proceso riguroso de modelización de la incertidumbre y el análisis del riesgo que permita centrar los esfuerzos de análisis en aquellos elementos cuyo efecto relativo es mayor.



### 4.3.2 La modelización de la incertidumbre

Las principales etapas en un proceso de modelización de la incertidumbre y el análisis de riesgo de un proyecto de inversión son las siguientes:

#### 1. Planteamiento formal del proyecto

Hay que plantear un modelo simplificado de la realidad que haga manejable el problema recogiendo las relaciones existentes entre las variables, con el fin de predecir los flujos de costes y beneficios a lo largo del tiempo para, una vez actualizados, poder predecir cuál será el VAN del proyecto según los distintos valores que tomen las variables.

Las principales variables y parámetros que se suelen incluir son la inversión inicial, los costes operativos anuales fijos y variables de la infraestructura y equipo móvil, la demanda desviada y generada y el valor del tiempo. A veces las características del proyecto afectan a la elección de las variables relevantes.

#### 2. Selección de las variables de riesgo

La razón de reducir al máximo el número de variables que se incluirán en el análisis de riesgo es que, cuantas más variables se incluyan, es más difícil que se puedan establecer las correlaciones existentes entre las distintas variables y por tanto, es más probable que los resultados obtenidos sean inconsistentes.

Sólo se deben elegir las variables que además de poder cambiar, si lo hiciesen modificarían de forma significativa los resultados del proyecto. Por tanto se pueden excluir las variables que cumplen que tienen alto impacto si cambian, pero es improbable que cambien. También pueden no tenerse en cuenta aquellas que es probable que cambien, pero si lo hacen el impacto no es significativo.

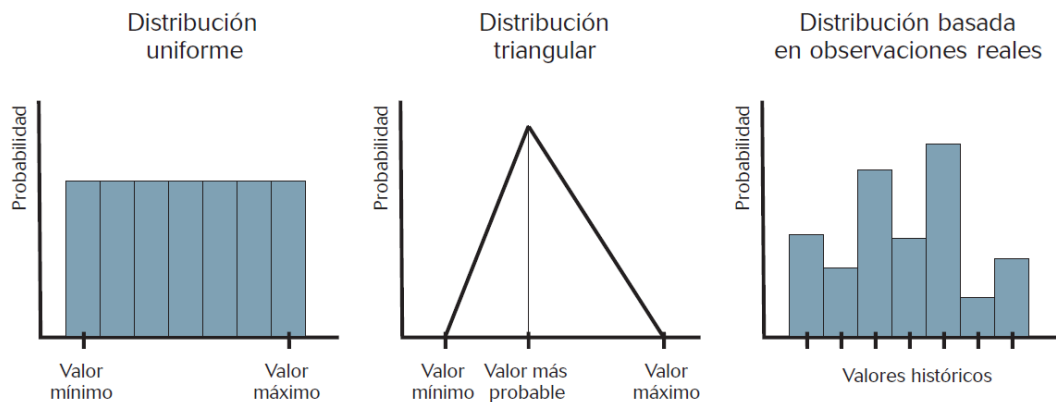
#### 3. Modelización de las distribuciones de probabilidad

Debido a la dificultad que tiene predecir exactamente el número de usuarios futuro y la evolución de los costes, muchos proyectos de inversión en transporte presentan incertidumbre en la demanda y en los costes. Es más factible predecir un valor máximo y un mínimo para cada variable, así como el valor más probable entre los dos extremos. La elección del rango y del tipo de función de probabilidad se basa tanto en datos históricos como en la visión de futuro de la persona que realice el estudio.

Cuando la información disponible se limita a valores máximos y mínimos de una variable, se suele asignar una misma probabilidad a los valores comprendidos entre dichos extremos. Es decir una distribución uniforme.

Si además se dispone del valor más probable de la variable, puede utilizarse una distribución triangular.

Por último, si se tienen datos históricos puede construirse un histograma de frecuencias y deducir a partir de éste las probabilidades correspondientes.



*Figura 36: Distribuciones de probabilidad usuales*

#### 4. Simulación de los posibles resultados del proyecto

Cuando ya están definidas las distribuciones de probabilidad de las variables de riesgo, la evaluación económica del mismo consiste en utilizar programas de simulación en los que los cálculos del modelo especificado para hallar el VAN se ejecutan un número muy elevado de veces, eligiendo de manera aleatoria, un valor de acuerdo con su función de probabilidad.

##### 4.3.3 Criterios de decisión bajo incertidumbre

Los resultados obtenidos mediante la simulación pueden mostrarse como una función de distribución de probabilidad. Esta función permite calcular la probabilidad asociada de que el VAN se sitúe por encima o por debajo de un determinado valor.

El riesgo del proyecto sigue siendo el mismo con el análisis simple de valores esperados que con un test de sensibilidad; sin embargo, el riesgo de tomar una decisión equivocada disminuye tras un análisis de riesgo bien planteado.

Cuando la decisión que ha de tomarse es elegir qué proyecto de inversión debe realizarse, ésta debe formularse teniendo en cuenta si existen o no otros proyectos alternativos. En cada caso existen tres posibilidades:

#### 4.3.3.1 Decisión sobre la realización de un único proyecto:

##### 1. Aceptar/revisar el proyecto

Cuando la distribución de probabilidad del VAN social tiene un valor mínimo negativo y su máximo es positivo, la decisión se basa en que el valor esperado del VAN social puede ser negativo o positivo, y en la probabilidad de que dicho VAN pueda tomar valores negativos.

Si el valor esperado del VAN social es positivo y el VAN financiero es igual o mayor que cero y se considera que la probabilidad acumulada de los valores negativos es suficientemente baja, debe aceptarse el proyecto. Si el VAN financiero es negativo y existen restricciones presupuestarias deberían examinarse otras políticas de precios.

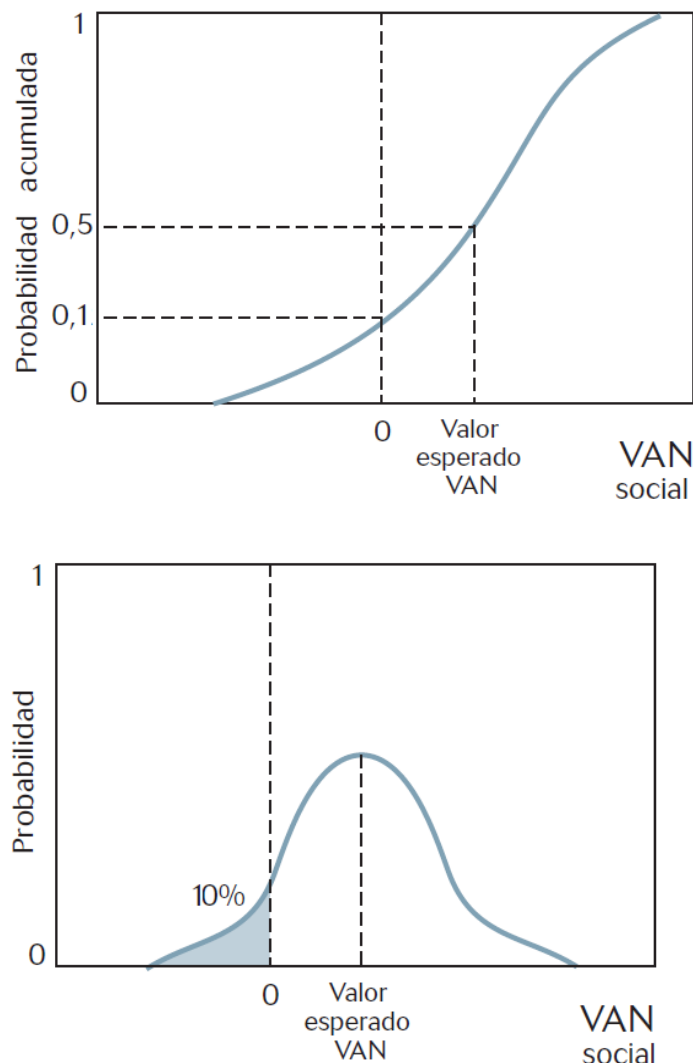
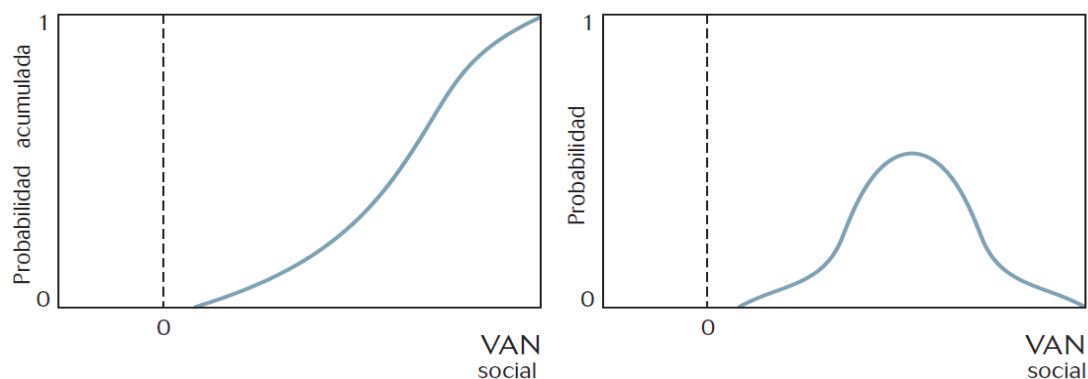


Figura 37: Función de distribución del VAN social. Caso 1

Si la probabilidad de ocurrencia de valores negativos del VAN alcanza un valor alto, aunque el valor esperado del VAN social sea positivo, puede ser razonable replantearse la realización del proyecto. En la figura anterior, aunque el valor esperado del VAN social es positivo, la probabilidad de que se tenga un valor del VAN negativo es del 10%. Puede estudiarse la manera de reducirlo mediante más información, modificando el nivel de servicio, modificación de contratos, etc. Para así poder reducir la probabilidad de los valores negativos.

## 2. Aceptar el proyecto condicionado al resultado financiero

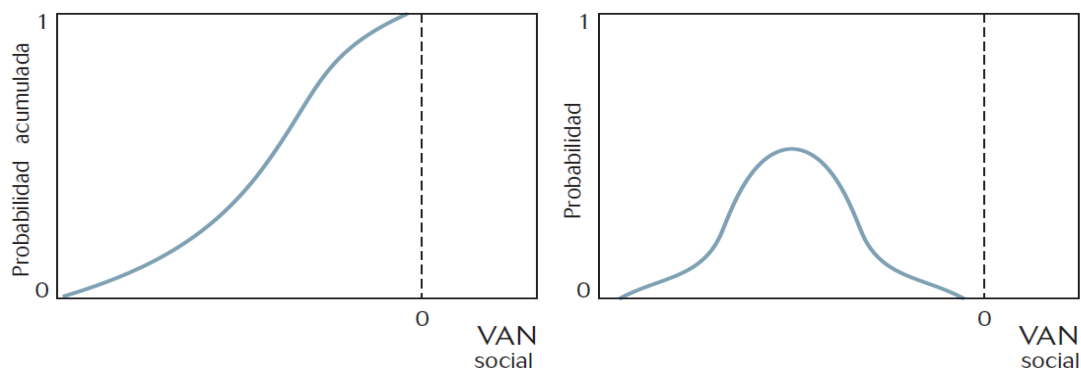
Cuando la distribución de probabilidad del VAN social tiene todos los valores posibles positivos, el proyecto debe realizarse sólo si el VAN financiero es igual o mayor que cero. Si el VAN financiero fuera negativo y existieran restricciones presupuestarias deberían examinarse otras políticas de precios o de nivel de servicio.



*Figura 38: Aceptar condicionadamente el proyecto*

## 3. Rechazar siempre el proyecto

Un proyecto debe ser rechazado siempre que los valores posibles del VAN social sean todos negativos. En este caso el VAN financiero no es necesario estudiarlo.



*Figura 39: Rechazar siempre el proyecto*



#### 4.3.3.2 Decisión entre dos o más proyectos:

##### - Un proyecto siempre resulta preferible a otro

Este es el caso en el que se tienen dos proyectos A y B, y uno de ellos es siempre resultase mejor (B en el ejemplo de la figura). Esto se da cuando el VAN de los proyectos no se cortan y los valores que toma la función de distribución de uno de ellos es superior al del otro proyecto que se está estudiando. Si el proyecto que tiene los mejores valores del VAN social resulta que tiene un VAN financiero negativo, como se explicó anteriormente, se tendría que examinar la política de precios o de nivel de servicio.

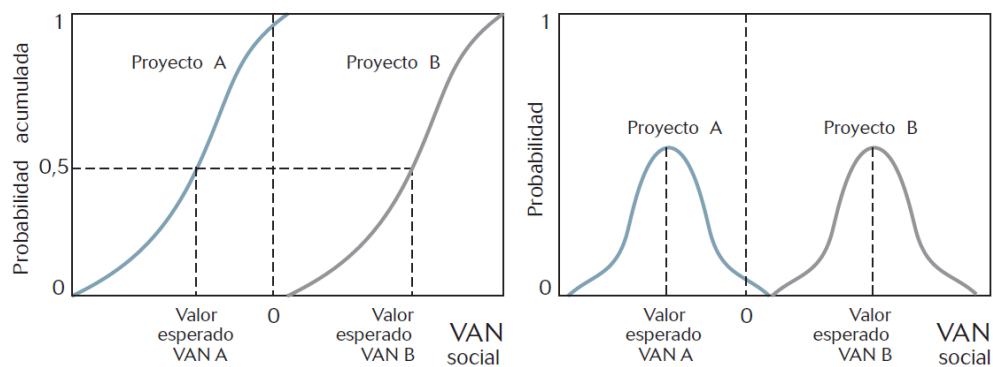


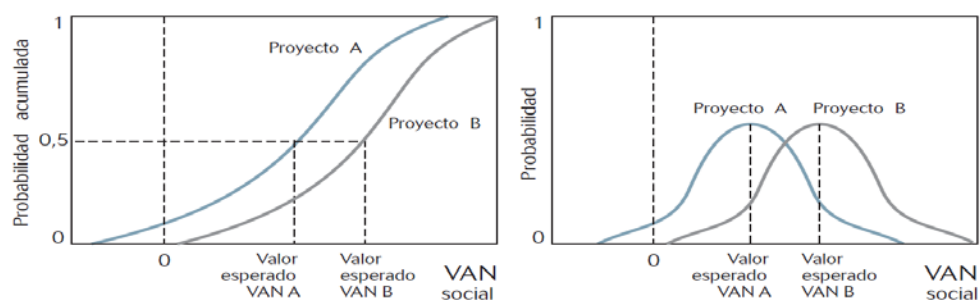
Figura 40: Elección de un proyecto que es mejor que otro

##### - La selección depende del resultado financiero

Las funciones de densidad de dos proyectos pueden cortarse en un punto. En este caso la elección dependerá del valor del VAN financiero de ambos proyectos.

Si el VAN financiero en ambos proyectos es negativo y existen restricciones presupuestarias deben examinarse otras políticas de precios. Si el VAN financiero del proyecto A es positivo y el riesgo asociado a este proyecto se considera asumible y el VAN financiero de B es negativo, debe elegirse el A si la disponibilidad de fondos no permite elegir el de mayor VAN social esperado.

Como se observa en la siguiente figura el VAN social del proyecto B es superior al del A y su función de densidad se corta en un punto. Obviamente, si el VAN financiero del proyecto B fuese positivo se tendría que elegir dicho proyecto.



*Figura 41: Elección del proyecto en función del VAN financiero*

**- La selección depende de la actitud ante el riesgo**

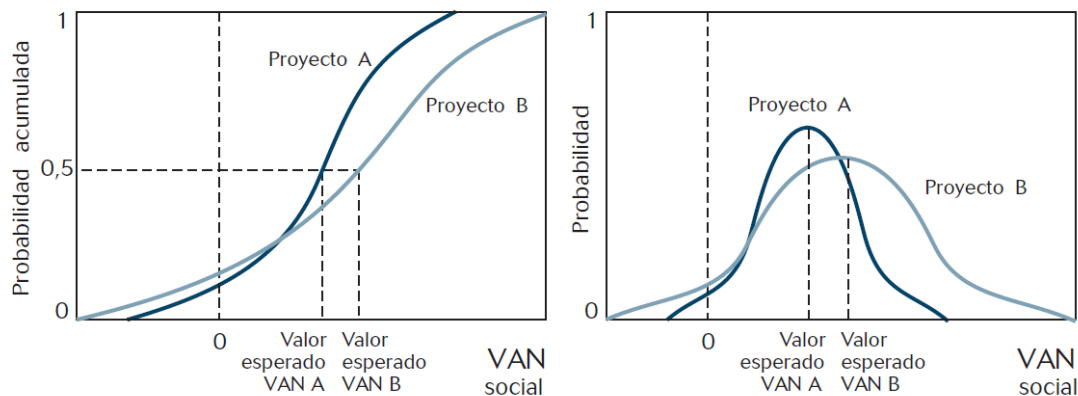
Cuando se tiene que decidir entre dos proyectos A y B, y sus distribuciones de probabilidad acumulada se cruzan, la elección dependerá del riesgo asociado a los mismos y del VAN financiero.

Si el VAN financiero es positivo en ambos casos, el proyecto que se debe seleccionar es el de mayor VAN social esperado siempre y cuando dicho proyecto tenga una variabilidad tal que sea aconsejable decantarse por el del VAN inferior.

Si el VAN financiero es negativo en ambos proyectos debe examinarse de nuevo la política de precios y de nivel de servicios.

Si el VAN financiero de un proyecto es positivo y el del otro es negativo, habría que elegir el primero si la disponibilidad de fondos no permite elegir el de mayor VAN social, en el caso de la siguiente figura, el proyecto B.

Si se elige el proyecto B, que es el de mayor VAN social esperado, se observa que este proyecto tiene un mayor riesgo asociado ya que la probabilidad de obtener un valor negativo del VAN social es mayor que para el proyecto A. En este caso la persona o agencia que realiza el estudio decidirá que proyecto elegir en función del riesgo que quiera asumirse.



*Figura 42: Elección del proyecto en función del riesgo*



#### 4.3.4 La decisión de retrasar un proyecto

Incluso con un VAN social y financiero positivo puede darse el caso de que sea socialmente rentable esperar a construir el proyecto. Esto se debe a que el resultado puede mejorar porque la demanda está creciendo o bien que se revele información no disponible en el presente.

Si se retrasa el proyecto se gana el tipo de interés sobre el valor de la inversión pero se pierde el beneficio del primer año, aunque se gana el correspondiente a la prolongación del proyecto en un año. Por tanto conviene esperar en el caso de que:

$$\frac{i \cdot I}{1 + i} + \frac{B_{T+1}}{(1 + i)^{T+1}} > \frac{B_1}{1 + i}$$

*Ecuación 46: Condición necesaria para retrasar un proyecto*

El primer término corresponde a la suma del beneficio de posponer el proyecto un año y los beneficios actualizados del año T+1 que se obtienen como consecuencia de no invertir en el año T. En el segundo miembro aparece el beneficio perdido debido al retraso del proyecto.

Si la opción de retrasar revela información adicional, el invertir hoy supone perder el valor económico de dicha información que se revela esperando, por lo que debe reflejarse como coste en el cálculo del VAN. La utilización del VAN supone de manera implícita que, o bien la inversión es reversible y que se puede por tanto rectificar en caso de que las expectativas de demanda y costes no sean favorables; o bien, que siendo irreversible la opción de retrasar el proyecto no es factible ya que la decisión se toma en el presente o nunca.

Cuando existe incertidumbre, la inversión es irreversible y se puede retrasar el proyecto, la regla de decisión de aceptar un proyecto si su VAN es positivo es válida siempre que se incluya el coste de oportunidad que supone invertir en el futuro debido a que al posponer la inversión se puede obtener información de valor económico.



## 4.4 Completando el modelo básico

### 4.4.1 Limitaciones del modelo básico

El modelo básico de evaluación descrito anteriormente permite predecir si un proyecto será socialmente rentable, mediante la comparación de corrientes de beneficios y costes esperados, previamente identificados, cuantificados y actualizados con la tasa social de descuento.

En una economía competitiva y con utilización plena de los recursos, sin distorsiones por la existencia de impuestos o efectos externos, los precios de mercado de los factores productivos reflejan los costes de oportunidad de su empleo en proyectos públicos y los precios de mercado reflejan la valoración marginal de dichos bienes por los individuos que componen la sociedad. Con un mercado de capitales perfecto, el tipo de interés puede utilizarse como tasa social de descuento.

En la práctica se dan un conjunto de hechos que se alejan del ideal competitivo. Las empresas venden por encima del coste marginal cuando las imperfecciones de la competencia lo permiten, existen subvenciones e impuestos, y la actividad económica produce efectos positivos y negativos que afectan a diferentes grupos de individuos.

### 4.4.2 Precios sombra

Los proyectos de inversión en infraestructuras y servicios de transporte utilizan una serie de inputs, para la obtención de outputs como puede ser el ahorrar tiempo en una ruta alternativa a una existente.

El trabajo o la energía utilizada, el tiempo ahorrado o las muertes evitadas en carretera deben multiplicarse por un precio para así convertirlos en unidades monetarias que permitan calcular la rentabilidad social del proyecto. El precio que hay que utilizar es el que refleja el coste de oportunidad de utilizar los inputs o en el caso de los outputs, lo que los individuos están dispuestos a pagar por ellos.

La elección de una unidad de medida u otra afecta a los valores absolutos aunque no al resultado de la evaluación, es decir, la decisión de aceptar o rechazar no cambia al usar unas unidades u otras. Con independencia de la unidad elegida, los precios que se utilicen deben reflejar el coste de oportunidad de los inputs y el valor output para la sociedad.



#### 4.4.3 Tasa social de descuento

En la evaluación financiera de un proyecto de transporte, la tasa (privada) de descuento que se suele utilizar coincide con el tipo de interés vigente en el mercado. Sin embargo, para la elección de la tasa social de descuento se plantean generalmente tres posibilidades:

- El tipo de interés de mercado
- La tasa marginal de preferencia temporal
- La tasa marginal de productividad del capital

La elección de la tasa social de descuento tiene un impacto considerable en la rentabilidad del proyecto, sin embargo, es muy complicado conocer su valor exacto. Esta tasa convierte a valores del año base los flujos de beneficios y costes de los proyectos. La tasa social de descuento es el parámetro que determina la equivalencia entre valores presentes y futuros.

Los proyectos de inversión en infraestructuras de transporte consisten básicamente en sacrificar consumo en el presente para obtener unos servicios de desplazamiento durante 30 ó 40 años. Normalmente los proyectos tratan de realizar en el menor tiempo posible y en las mejores condiciones de fiabilidad y confort unos desplazamientos que ya se realizaban por una ruta menos conveniente. Decidir sobre la rentabilidad social de un proyecto de estas características exige identificar y cuantificar los beneficios y costes durante la vida del mismo, y ponderar dichos beneficios y costes una vez determinada la tasa social de descuento. Dicha tasa debe reflejar la preferencia de la sociedad entre consumo presente y futuro y además debe valorar los beneficios de aquellos individuos que aún no han nacido.

Se puede tomar como tasa social de descuento a: el tipo de interés de mercado, a la tasa marginal de preferencia temporal y a la tasa marginal de productividad del capital

Las tres tasas citadas anteriormente coinciden cuando los mercados son perfectos, es decir, cuando no hay restricciones sobre los mercados financieros, ni impuestos, ni otras distorsiones sobre la producción o el consumo. Por tanto, en una economía sin distorsiones, el tipo de interés de mercado representa el coste de oportunidad del capital destinado a la financiación de los proyectos de inversión. Se obtiene en el mercado de capitales donde la oferta y la demanda de fondos prestables encuentran un valor que hace que se igualen el ahorro ofrecido con los préstamos demandados. El mercado tiende a igualarse ya que las opciones de inversión tienen productividad marginal decreciente, mientras que el ahorro es una función creciente del tipo de interés.



En la realidad esto no es así. En un mercado de capitales con impuestos la tasa marginal de productividad del capital es mayor que el tipo de interés ya que una vez realizado el proyecto habrá que pagar impuestos sobre los dividendos; de igual manera la tasa marginal de preferencia temporal será inferior al tipo de interés ya que el ahorrador ahorra con remuneraciones netas de impuestos superiores a dicho tipo.

Por ello conviene diferenciar dos situaciones: si el sector público compite con el privado por la realización del proyecto, la tasa de descuento a utilizar será la tasa marginal de productividad del capital. Pero si por el contrario se trata de evaluar proyectos dentro del sector público, obteniéndose financiación de varias fuentes, puede actuarse de dos maneras

1. Utilizar la media ponderada entre la tasa marginal de preferencia temporal y la tasa marginal de productividad del capital.
2. Utilizar la tasa marginal de preferencia temporal, pero habiendo convertido previamente los beneficios netos en flujos de consumo mediante un precio sombra de capital. Este método requiere mayor información porque necesita saber el destino de los beneficios que se obtienen a lo largo de la vida del proyecto.

Elegir una tasa u otra es muy complicado debido a las grandes dificultades de información que se tienen en la evaluación del proyecto. La variabilidad es alta y simultáneamente, en países de características similares han coexistido tasas que van desde el 5% al 8% sin que se pueda encontrar razones económicas que justifiquen dicha diferencia.

#### **4.4.4 Medición monetaria: coste de los accidentes e impactos ambientales**

Los accidentes, la contaminación atmosférica, la contaminación acústica o la destrucción del paisaje son costes de los proyectos de transporte para la sociedad, de la misma manera que lo son los materiales, mano de obra, energía, etc. Sin embargo, estos pueden llegar a ser beneficios si con la ejecución del proyecto disminuyen. Cuando se evalúa la construcción de una nueva infraestructura hay que incluir el efecto barrera sobre el territorio, la destrucción del paisaje y el ruido que produce a los habitantes de las áreas afectadas. También hay que incluir beneficios como puede ser los accidentes de tráfico evitados por la construcción de un túnel que elimina un tramo de concentración de accidentes.

El coste de los accidentes de tráfico está compuesto por la pérdida de la vida de los que mueren, el deterioro de la calidad de vida de los heridos y el impacto psicológico sobre los familiares de las víctimas implicadas en un accidente de circulación. Además se asocian otros costes de naturaleza económica, como la pérdida de producción de las víctimas, daños materiales y gastos sanitarios.

La valoración monetaria de los costes de naturaleza económica asociados a los accidentes de tráfico no tiene mayor complicación que la disponibilidad de datos de ciertos costes conjuntos. Sin embargo la pérdida de vidas y las lesiones son complicadas de valorar



económicamente ya que no son “bienes” que se encuentren en el mercado. Muchos economistas definen “el valor de la vida” como la disposición a pagar por reducir el riesgo de accidentes.

Las personas no están dispuestas a pagar cualquier cantidad por reducir el riesgo a tener un accidente. Así lo que en realidad se busca no es el valor de la vida en sentido estricto, sino cuánto están dispuestos a pagar los individuos por aumentar el nivel de seguridad. Por tanto lo que se valora en el análisis coste beneficio es el aumento o la reducción de la probabilidad de accidente, que puede traducirse en lesiones o incluso la muerte de la víctima. No se trata de calcular el valor de la vida en un sentido literal, sino de aproximarse a la valoración implícita de la sociedad acerca de cuánto está dispuesta a sacrificar de los recursos disponibles por reducir el riesgo físico y por reducir el número de muertes.

Si tratamos ahora el impacto medioambiental, presenta un problema similar a la valoración monetaria de pérdida de vidas humanas. Las posiciones sobre en qué medida es razonable asignar valores monetarios a efectos externos negativos de los proyectos de transporte sobre el medioambiente varían, desde los que piensan que dar valores monetarios a los bienes ambientales es el comienzo de su degradación, a los que argumentan que el medio ambiente es similar a otro bien, sobre el que los individuos tienen preferencias bien formadas y por tanto se le puede asignar un valor monetario.

A medio camino existen diferentes grados de confianza sobre lo que la aproximación económica puede aportar para incluir el impacto ambiental dentro de un proyecto como un beneficio o coste más. Existen dos aproximaciones para la valoración de los impactos ambientales:

- 1 La fundamentada en las preferencias reveladas, es decir, observadas en el mercado.
- 2 La basada en preferencias declaradas, es decir, manifestadas por los individuos mediante encuestas.

En las preferencias reveladas los tres métodos más utilizados son: el de los gastos para evitar o mitigar el daño, el de los precios hedónicos y el del coste de viaje.

El primer método consiste en utilizar el gasto realizado por los afectados para protegerse contra el impacto. Este puede ser el caso de una familia que realiza reformas de insonorización de su hogar para reducir el ruido generado por la circulación de vehículos en una carretera cercana. Este método es imperfecto ya que el impacto sólo lo evitan aquellos que toman medidas.

El segundo método consiste en estudiar el impacto económico que tiene la construcción de una infraestructura cerca de un núcleo de viviendas. Por ejemplo, estudiar la diferencia de precios de una vivienda situada cerca de la M-30 con otra de similares características en una





zona diferente. La hipótesis de partida es que si por viviendas similares los individuos están dispuestos a pagar mayor cantidad para evitar el impacto que genera la infraestructura, se puede obtener una medición monetaria a la disposición a pagar por evitarlo, y por tanto valorar el impacto en términos monetarios.

El método del coste de viaje trata de estimar una función de demanda que recoja lo que los individuos están dispuestos a pagar por el uso de la infraestructura, entendiéndose como disposición a pagar como el precio global o generalizado. Cuanto más lejos viva el individuo de la infraestructura el precio generalizado será mayor, por lo que, para una determinada distancia, la demanda es nula.

Los métodos utilizados en las preferencias declaradas presentan una limitación: sólo miden el valor de uso, sin medir el valor de uso pasivo que ya ha sido reconocido como relevante a la hora de valorar el impacto medioambiental. Para dar un valor monetario al uso pasivo, la alternativa es la creación de un mercado hipotético, encuestando a los individuos, y preguntándoles directamente cuánto están dispuestos a pagar por evitar un daño ambiental.

El bien medioambiental tiene naturaleza de bien público, ni es excluible ni rival, y los precios de mercado no reflejan su valor, dada la gran importancia de las externalidades. Muchos individuos estarían dispuestos a pagar por la conservación de los océanos, limpios de contaminación, aunque no disfruten de su uso directo. El método de la valoración contingente trata de capturar el valor de no uso o valor pasivo, que tienen los bienes ambientales. El gran inconveniente que tiene este método es que los individuos no tienen preferencias formadas sobre los bienes medioambientales y que lo que se obtiene en las encuestas son respuestas hipotéticas a preguntas hipotéticas, en un contexto en el que el encuestado suele desconocer aspectos relevantes del bien valorado o manifestar respuestas estratégicas.

#### **4.4.5 Efectos indirectos del proyecto**

El principal efecto directo de la construcción de una infraestructura, que reduzca el tiempo de viaje, es la reducción de los costes de las empresas y la mayor disponibilidad de tiempo de los individuos que utilizan la nueva vía.

En una segunda fase de efectos, las empresas aumentan sus beneficios y los consumidores se benefician de precios más bajos, en proporciones que dependerán del grado de competencia en la economía y del comportamiento de los costes ante aumentos de la demanda. Además, los cambios en los precios de los bienes y servicios afectados por la reducción de costes originados por el proyecto de transporte afectarán a otros mercados de bienes y servicios. Por ejemplo, al construir una vía que reduce el tiempo de viaje a una zona turística puede aumentar el número de visitas a dicha zona, por lo que la demanda de servicios comerciales se vería incrementada.





Estos efectos complican la evaluación del proyecto, por lo que en estas evaluaciones se suelen seguir las siguientes pautas a la hora de decidir si incluir o no los efectos indirectos que tiene la nueva infraestructura sobre los mercados secundarios:

- 1 Si el servicio de transporte, cuyo coste se reduce como consecuencia del proyecto, es un input en el proceso productivo de otras empresas y la economía es en general competitiva, se ignora en la valoración los efectos indirectos en los mercados que utilizan dichos servicios.
- 2 Cuando los mercados secundarios no son competitivos y existe poder de mercado, el aumento o la reducción de la demanda que ocurra en dichos mercados, sí produce un efecto que habría que incluirlo en la evaluación.
- 3 Si en los mercados secundarios se producen bienes y servicios que son complementarios o sustitutivos de los bienes y servicios del mercado primario, y la economía es competitiva, se pueden ignorar los efectos indirectos en la evaluación.

Normalmente se suele ignorar al principio los efectos indirectos y se estudian únicamente los directos, a menos que la singularidad del proyecto aconseje lo contrario. Muchos de los efectos indirectos son comunes a otros proyectos, que se realizarían si el proyecto evaluado no se llevase a cabo y por tanto su efecto es irreversible en la comparación de proyectos.

Finalmente, y con relación a los efectos territoriales, los de desarrollo regional y los cambios en la localización de las empresas, es recomendable añadir una descripción cualitativa en su caso, ya que la evidencia disponible no permite ser demasiado optimistas sobre los efectos positivos de desarrollo local de un proyecto de transporte que reduce el coste de desplazar bienes y personas entre una zona rica y otra pobre. La carretera o la línea ferroviaria, permiten viajes en ambos sentidos y aunque el efecto global sobre la economía del país sea positivo, el local es discutible y depende de un conjunto de factores cuyo efecto final es a priori muy difícil de predecir.



#### 4.4.6 Incentivos y contratos

La obtención de un VAN positivo antes de realizarse el proyecto no significa que con posterioridad, durante la vida efectiva de la concesión, se obtenga un VAN social positivo. Como en muchos casos las empresas privadas participan en la construcción y explotación de las infraestructuras firmando contratos de concesión, conviene discutir de qué manera afecta el diseño de estos contratos a que se obtengan los beneficios sociales netos estimados en la fase de evaluación económica. El caso más convencional y usual de concesión es el de plazo fijo. A través de los contratos de concesión, el gobierno puede obtener financiación privada y, simultáneamente, se ofrecen incentivos económicos a los inversores privados para que sea atractivo realizar estos proyectos.

Una concesión es un contrato de largo plazo entre el gobierno y una empresa o consorcio de empresas privadas, a través del cual las partes asumen una serie de compromisos y obligaciones para llegar a alcanzar unos objetivos, como son:

- 1 La construcción de la infraestructura, con la calidad establecida y al mínimo coste posible.
- 2 Mantenimiento adecuado de la infraestructura y otros elementos incluidos en la concesión durante el periodo firmado.
- 3 Provisión de servicios satisfactorios a los usuarios.
- 4 Promover el uso eficiente a corto plazo de la infraestructura, mediante precios adecuados.
- 5 Ampliación de la infraestructura a largo plazo en función a las necesidades de tráfico.
- 6 Equilibrio financiero para el concesionario.

Para tratar de alcanzar los objetivos señalados, tanto el gobierno como las empresas que acometen el proyecto se enfrentan a varias dificultades.

El mayor problema a la hora de diseñar una concesión de un proyecto de transporte consiste en la incertidumbre sobre el volumen de demanda futura, ya que dada la naturaleza de estos proyectos es muy difícil realizar buenas predicciones. Existen muchas circunstancias que pueden verse alteradas durante los más de treinta años que dura como media una concesión, que pueden alterar significativamente el volumen de demanda y que conducen a la renegociación del contrato.

Los costes también tienen incertidumbre, ya que algunos costes son difíciles de predecir, especialmente en la fase de construcción. La magnitud de los costes asumidos por el concesionario depende en gran medida de los incentivos que el contrato incorpore, para que al concesionario le compense el esfuerzo de acercarse a un mínimo.



Como el gobierno quiere que la construcción de una infraestructura de una calidad determinada, se realice al mínimo coste posible, la mejor forma de llevar a cabo la selección del concesionario es a través de mecanismos de licitación. Los mecanismos más habituales son subastas en los que los concursantes son pre-seleccionados a partir de criterios como la experiencia en el sector y la capacidad financiera. Hay diferentes variantes en el sistema de subastas, pero todas comparten la característica común de que la concesión se otorga por un plazo fijo de tiempo. Es decir, los concesionarios saben de antemano cuánto va a durar el periodo durante el cual van a poder explotar la concesión y obtener ingresos por cobrar a los usuarios por el uso de la infraestructura.

Las renegociaciones producen efectos no deseados sobre el contrato de concesión. Además, suelen introducir ajustes en el precio de utilización de la infraestructura que al final acaban pagando los usuarios, incentivando un uso ineficiente de la infraestructura. Para situaciones de tráfico bajo los operadores presionarán para aumentar el precio. En este caso, es decir, en situaciones de demanda baja, si el gobierno autoriza el incremento de precios, la demanda descenderá aún más. De hecho, si por el contrario la demanda fuese tan alta que se producen problemas de congestión, lo que debería hacerse es subir los precios, para de esta manera desanimar a aquellos usuarios que obtienen un menor beneficio o bienestar de su utilización. Sin embargo, en estos casos, la demanda alta está asociada a beneficios extraordinarios para el concesionario y a mayor presión de los usuarios para la bajada de precios.

La solución al problema de la incertidumbre sobre el tráfico podría ser empezar a abandonar la idea de que el periodo de vigencia del contrato de concesión tenga que ser fijo y determinado a priori, antes de conocerse con exactitud cuál es la demanda que va a tener la infraestructura. Se pueden diseñar concesiones de plazo variable, cuya duración esté vinculada al nivel de demanda, y que permita ajustes automáticos del periodo concesional sin necesidad de entrar en renegociaciones que, como se ha señalado, tienen consecuencias negativas para todos los implicados.

Los problemas de la participación de las empresas privadas mediante el sistema de concesión de plazo fijo se deben fundamentalmente a la naturaleza de la infraestructura (altos costes, vida prolongada y especificidad de los activos), a la incertidumbre de la demanda y a la asimetría de la información de los costes. Si el periodo fuese variable, sería posible acomodar situaciones de demanda alta o baja sin necesidad de renegociación, ni tener que realizar ajustes en los precios. En situaciones de demanda baja, la concesión se extendería permitiendo la recuperación de los costes totales. Ante situaciones de demanda alta, por el contrario, la recuperación de los costes tendría lugar antes por lo que la concesión podría terminar antes. Esto puede conseguirse mediante subastas en las que las empresas licitan el mínimo valor de ingresos netos que desean recuperar. En este tipo de concurso el gobierno es quién determina el precio de utilización de la infraestructura y no va a requerir predicciones de demanda para calcular los ingresos esperados por la concesión.



#### 4.4.7 Beneficios y beneficiarios

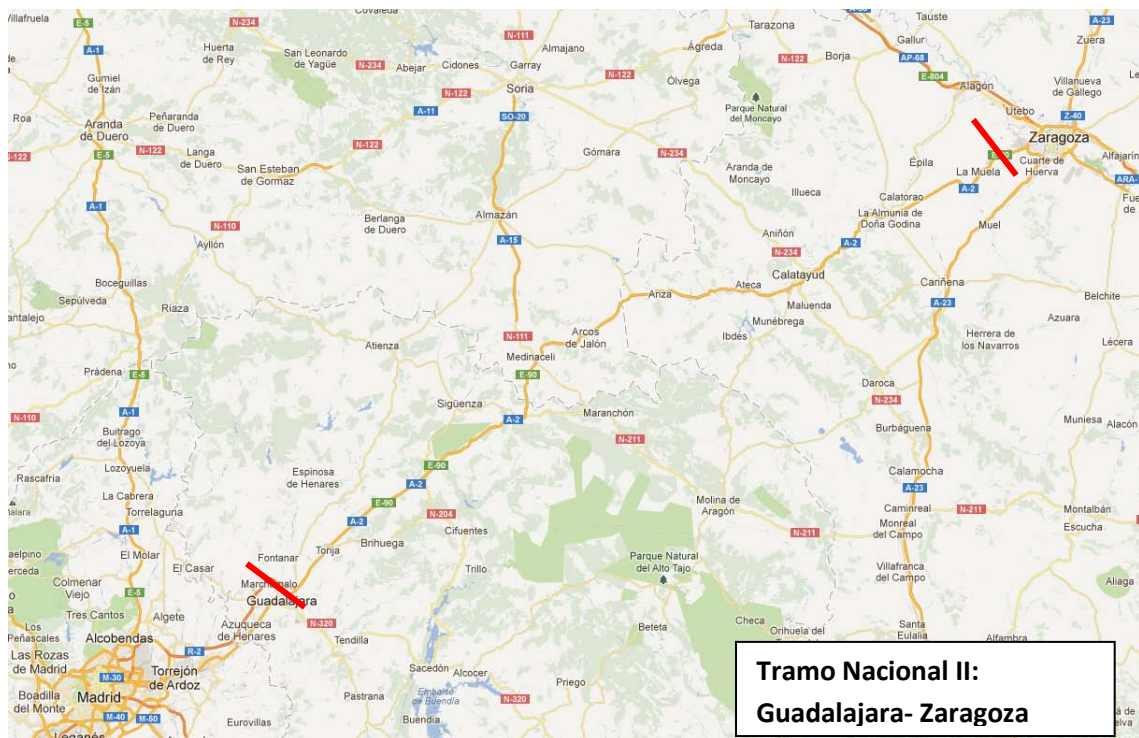
La evaluación económica desde una perspectiva social tiene la característica de que además de tener en cuenta los ingresos se tiene en consideración el excedente de los consumidores, es decir, lo que hubiesen pagado de más si se lo hubiesen cobrado. Además, el estudio de los beneficios que hay que considerar, no está centrado sólo en los futuros usuarios de la infraestructura sino que se estudia para toda la sociedad. Las externalidades externas negativas se han de contabilizar de igual manera que se contabilizan los costes y los ingresos.

Idealmente se busca mejorar el bienestar social que se genera al ejecutar el proyecto. En la práctica esto es muy complicado, ya que la medición de cambios en el bienestar social exige, además de definir algún tipo de función de bienestar, medir los cambios en la utilidad individual que se experimentan. Dadas las dificultades, normalmente en las evaluaciones los economistas se conforman con una aproximación, consistente en una medición monetaria de los cambios en la utilidad.

Rara vez se ponderan los beneficios según el grupo afectado. El criterio que se aplica es el de compensación potencial de Kaldor Hicks que no exige una compensación efectiva y que equivale a la aplicación de la regla siguiente: si el beneficio obtenido por los ganadores permite a estos compensar a los perdedores y todavía salir ganando, entonces el proyecto debe ejecutarse. Recordando lo visto en puntos anteriores, que un proyecto tenga un VAN mayor que cero no quiere decir que se deba realizar, ya que si no hay financiación pública para acometer todos los proyectos que satisfagan dicha condición, habrá que seleccionar aquél que tenga el VAN máximo respetando la restricción presupuestaria.

## 4.5 Evaluación económica y financiera del proyecto

Se ha decidido realizar el estudio de viabilidad del proyecto sobre un tramo, en vez de hacerlo sobre la red total debido a que es mucho más sencillo y los resultados obtenidos se pueden extrapolar fácilmente a toda la red de carreteras del país. El tramo seleccionado para realizar el estudio de viabilidad de implantación del proyecto ha sido el que comprende entre la localidad de Guadalajara y la ciudad de Zaragoza debido a que no existen carreteras de peaje en dicho tramo y a la alta demanda de transporte por carretera del tramo. La longitud de dicho tramo es de aproximadamente 240 km. La vía a construir constará de un recorrido de 230 km de longitud, ya que los tramos serán más rectos.



*Figura 43: Tramo de estudio seleccionado*

En la siguiente tabla se muestra la Intensidad Media Diaria de la Nacional II en el tramo comprendido de estudio, recogidos de las publicaciones que están disponibles en la página de la Dirección General de Tráfico (a partir de ahora DGT):



	IMD total	IMD LIGEROS	VARIACIÓN	IMD PESADOS	VARIACIÓN IMD V PESADOS	%PESADOS
2005	20166.4	13180.2		6986.1		35%
2006	20357.2	13011.4	-1%	7345.8	5%	36%
2007	21821.4	15164.2	17%	6657.1	-9%	31%
2008	21586.4	15104.2	0%	6482.2	-3%	30%
2009	20306.2	14840.9	-2%	5465.3	-16%	27%
2010	20377.3	15035.7	1%	5341.6	-2%	26%
2011	19850.9	14748.5	-2%	5102.4	-4%	26%

Tabla 7: IMD tramo Guadalajara- Zaragoza. [Datos DGT]

Debido a la crisis y al aumento de los precios de los carburantes la demanda de transporte de vehículos pesados ha descendido un 30,5% desde 2006. Con la automatización del transporte de mercancías por carreteras, las empresas de transportes serán mucho más competitivas que ahora. Esto hace que puedan tener más vehículos de transporte de mercancías en circulación, lo que deriva en un mayor servicio prestado. Por tanto, podrán aumentar el margen de beneficios sustancialmente. La cifra de demanda actual de 5102 vehículos diarios, podrá aumentar considerablemente y recuperar, o superar, la cifra de 2006 una vez finalizada la construcción del proyecto. En 2011 la composición del tráfico registrada se muestra gráficamente en la siguiente figura:

### Proporción vehículos en el tramo de estudio

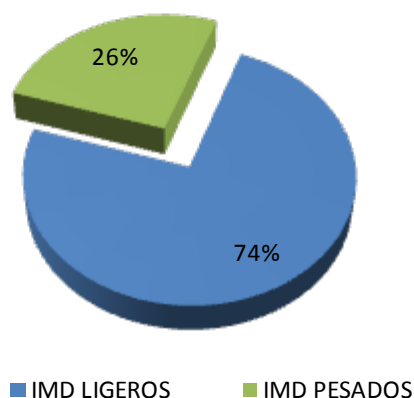


Figura 44: Composición del tráfico en 2011

Como se puede observar, más de la cuarta parte del tráfico, en el tramo de estudio es de vehículos pesados. Esto significa que con el proyecto se reducirá una parte importante del tráfico total en el tramo de la Nacional II que se está estudiando.



### 4.5.1 Consideraciones

Según la revista número 145 publicada por la DGT, el precio medio de la construcción de un kilómetro de autovía asciende hoy en día a 4,2 millones de euros. Es decir, la construcción de 230 kilómetros de carretera asciende a 966 millones de euros. Las partidas de costes se reparten, normalmente como sigue:

- El 25% explanación del terreno
- El 5% drenaje
- 23% del coste se destina a estructuras
- El 35% se destina a los firmes
- Los costes de señalización corresponde al 8% del total
- Un 3,5% son costes varios



Figura 45: Distribución de costes de construcción. [Ministerio de Fomento]

Previamente deben realizarse las expropiaciones y los posibles derribos de edificios o estructuras existentes. Los expertos fijan esto entre el 10 y el 20% del coste total de la obra.

Una vez construida la vía hay que realizar la corrección del impacto ambiental, el cual supone un incremento de:

- 5% debido a la elección de alternativas de materiales más caros que tengan menor impacto en el medio ambiente.
- 3% debido a medidas correctoras.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, en la siguiente tabla se recoge un resumen de la inversión estimada necesaria para la construcción del proyecto:

Concepto	Inversión necesaria (mill. €)
Construcción	966,0
Expropiaciones	96,6
Impacto ambiental	48,3
Medidas correctoras	29,0
<b>Total inversión</b>	<b>1139,9</b>

Tabla 8: Estimación de la inversión total necesaria



El proyecto tendría una vida útil de 40 años desde el inicio de la construcción. Los trabajos de construcción se llevarían a cabo en aproximadamente dos años, invirtiéndose un 60% del coste en el momento inicial del proyecto ( $t=0$ ), un 20% al final del primer año ( $t=1$ ) y un 20% al final del segundo año ( $t=2$ ). Tras la finalización de las obras, la autopista se abrirá al tráfico al comienzo del tercer año, contabilizándose los beneficios al finalizar dicho año ( $t=3$ ).

<b>Inversión inicial</b>	683,9
<b>Segunda inversión</b>	228,0
<b>Inversión final</b>	228,0

*Tabla 9: Inversión estimada anual*

Ante las dificultades financieras del Estado para acometer este proyecto, la construcción y explotación de la nueva ruta se realizará mediante un régimen de concesión. La empresa se financiaría a través del cobro de un peaje a cada vehículo por trayecto.

Se harán dos simplificaciones adicionales para poder realizar la evaluación:

La nueva ruta podrá absorber, con un nivel de congestión mínimo, el volumen del tráfico diario que circulará por la vía. Esto evita la necesidad de considerar políticas de precios complejas u otros mecanismos de racionamiento de la capacidad que afectarían al tiempo de viaje medio. Una política de precios que se suele usar es la de uso de tarifas de hora punta y las de hora valle, las cuales son inferiores a las primeras.

Los precios y los costes empleados en el proyecto reflejan de manera adecuada su coste de oportunidad. Esto es extensible a los fondos públicos destinados a la inversión, a los que se considera que no hay que aplicarles ningún factor de corrección para reflejar su coste de oportunidad.

Con estos datos, se procederá a aplicar el modelo básico descrito en el *apartado 2.2*, particularmente la aproximación basada en el cambio de excedentes en los implicados.

Para realizar la evaluación económica y poder responder a las preguntas de si debe construirse la nueva vía y de ser así, si alguna empresa privada estaría dispuesta a llevarla a cabo, hay que realizar el cálculo del VAN social y del VAN financiero. Para ello se utilizará la aproximación metódica basada en la suma de los cambios de excedentes de los diferentes agentes sociales afectados en este proyecto, por lo que la expresión a evaluar, según lo explicado en el *apartado 4.2.4.2*, viene dada por:

$$VAN_s = - \sum_{t=0}^2 \frac{I_t + E_t}{(1+i)^t} + \sum_{t=3}^{40} \frac{\Delta EC_t + \Delta EP_t + \alpha_1 q_{1t} - \alpha_0 q_{0t} - \varepsilon_1 q_{1t} + \varepsilon_0 q_{0t}}{(1+i)^t}$$





Donde el primer sumando representa el valor actualizado de la inversión necesaria para construir la vía añadiéndoles el coste del impacto ambiental  $E_t$ . Tanto los tipos impositivos  $\alpha$  como el coste externo unitario  $\varepsilon$ , se suponen constantes a lo largo del tiempo. El subíndice 0 se refiere a la situación sin proyecto y el subíndice 1 a la situación con proyecto.

Para realizar el cálculo del VAN financiero, únicamente se tendrá en cuenta los ingresos netos y costes de la infraestructura, es decir, no se contabilizará:

- La variación en el excedente de los usuarios.
- La variación en el excedente de los contribuyentes.
- Las externalidades.

Por tanto, la expresión a evaluar del VAN financiero, teniendo en cuenta lo que se ha mencionado anteriormente es igual a:

$$VAN_f = - \sum_{t=0}^2 \frac{I_t}{(1+i)^t} + \sum_{t=3}^{40} \frac{Imp_1 q_{1t} - Imp_0 q_{0t} - (C_{1t} - C_{0t})}{(1+i)^t}$$

Donde  $C_{0t}$  y  $C_{1t}$  son los costes de mantenimiento sin y con el proyecto respectivamente.

Debido a que, el tramo de estudio de la Nacional II, es de libre circulación, la expresión anterior queda de la siguiente forma:

$$VAN_f = - \sum_{t=0}^2 \frac{I_t}{(1+i)^t} + \sum_{t=3}^{40} \frac{Imp_1 q_{1t} - (C_{1t} - C_{0t})}{(1+i)^t}$$



#### 4.5.2 Cómputo de beneficios y costes sociales y privados

Para el cálculo de las expresiones anteriores hay que identificar todos los efectos directos del proyecto sobre los usuarios, la empresa concesionaria, los contribuyentes y los afectados por las externalidades derivadas de la construcción y explotación del proyecto. Se están ignorando los efectos indirectos del proyecto, como la revalorización del suelo, generación de empleo, atracción de nuevas empresas, etc. Esto es así ya que están contabilizados en los beneficios por ahorro de tiempo, ahorro en los costes operativos y en la disposición a pagar por los viajes de nueva generación. Otros efectos, como la recaudación impositiva o las externalidades, en mercados secundarios, se añaden a los beneficios y costes sociales del proyecto. Un usuario puede estar afectado por una externalidad, ser contribuyente y tener acciones de la empresa concesionaria. Las transferencias de renta se anulan al sumar los excedentes. Debe evitarse tanto el error de doble contabilización como el de ignorar alguna partida de costes o beneficios.

Para los usuarios de la actual Nacional II, la construcción de la nueva ruta supone que el precio generalizado ( $p$ ) en el que incurren en cada viaje se modifique. Actualmente no existe peaje ( $Imp_0=0$ ), por lo que los precios generalizados será igual a:

$$P_0 = z_0 + vt_0$$

$$P_1 = Imp_1 + z_1 + vt_1$$

Donde:

- $z$  representa el coste medio por viaje de utilización del vehículo.
- $t$  es el tiempo total del viaje.
- $v$  es la valoración monetaria de dicho tiempo por parte de los usuarios.
- $Imp$  es el peaje pagado por los usuarios incluyendo el IVA (21%) en la nueva ruta.

A continuación se explicarán las aproximaciones realizadas para cada sumando del precio generalizado .



## CÓMPUTO DEL COSTE MEDIO POR VIAJE (z)

Para conocer el coste medio por viaje en la ruta de estudio es necesario conocer primero el coste operativo medio. Este coste medio varía con el tipo de vehículo y la intensidad de uso, lo cual dificulta obtener un valor representativo. Se estudiará cómo varía el coste operativo de los vehículos pesados en función de la si se realiza el proyecto o no. En la siguiente tabla se muestra una estimación del coste operativo medio por kilómetro de un vehículo pesado en el caso de que no exista el proyecto.

			Vehículo pesado		
			DATOS	COSTE ANUAL	POR Km
DATOS GENERALES	COMPRA		70.000		
	DURACION EN AÑOS		15		
	Km/s. ANUALES		90.000		
	TIPO DE INTERES REAL		0		
COSTES FIJOS	FINANCIEROS			700	0,01
	IMPUESTOS			130	0,00
	SEGUROS ANUALES			1.200	0,01
	GARAJE ANUAL				0,00
	OTROS		SUELDO	24.000	0,27
	DEPRECIACION			4.667	0,05
	TOTAL FIJOS			30.697	0,34
COSTES VARIABLES	CONSUMO	COMBUSTIBLE	Gasoleo		
		PRECIO	1		
		% CONSUMO	27%		
		COSTES		34.726	0,39
	REVISION	CADA Km/s	30.000		
		IMPORTE	1.000		
		COSTES		3.000	0,03
	ACEITE	CADA Km/s	15.000		
		IMPORTE	400		
		COSTES		2.400	0,03
	RUEDAS	CADA Km/s	45.000		
		IMPORTE	2.000		
		COSTES		4.000	0,04
	TOTAL VARIABLES			44.126	0,49
TOTALES				74.823	0,83

Tabla 10: Estimación de costes por kilómetros para vehículos pesados.

Se ha supuesto que la media de kilómetros recorridos por los vehículos pesados, es de 90.000 kilómetros anuales. Para simplificar el estudio, todos los vehículos pesados pertenecen a empresas privadas de transporte, que tienen su personal transportista, que conduce el vehículo de un punto a otro. Se estima que el sueldo medio de un transportista es de 2000 euros mensuales, por lo que el sueldo anual asciende a 24000 euros. Con todas estas consideraciones el precio medio por kilómetro es de 0,83 euros.

Aunque el estudio de la viabilidad económica, se realiza para evaluar la construcción de una vía por la que circularán únicamente vehículos pesados, se estudiará también la variación en el coste operativo de los vehículos ligeros, para así determinar el beneficio de todos los usuarios de la ruta actual. En la siguiente tabla se muestra una estimación realizada para el coste por kilómetro medio de los vehículos ligeros:

			Turismo gama media			Turismo gama alta			
			DATOS	COSTE ANUAL	POR Km	DATOS	COSTE ANUAL	POR Km	
DATOS GENERALES	COMPRA		20,000				38,000		
	DURACION EN AÑOS		15				15		
	Km/s. ANUALES		25,000				25,000		
	TIPO DE INTERES REAL		1.00%				1.00%		
COSTES FIJOS	FINANCIEROS			200	0.008		380	0.015	
	IMPUESTOS			60	0.002		60	0.002	
	SEGUROS ANUALES			500	0.020		700	0.028	
	GARAJE ANUAL			700	0.028		700	0.028	
	OTROS								
	DEPRECIACION			1,333	0.053		2,533	0.101	
	TOTAL FIJOS			2,793	0.112		4,373	0.175	
COSTES VARIABLES	CONSUMO	COMBUSTIBLE	Gasoleo				Gasóleo		
		PRECIO	1.45				1.45		
		% CONSUMO	9.00%				7.00%		
		COSTES		3,263	0.131		2,538	0.102	
	REVISION	CADA Km/s	15,000				20,000		
		IMPORTE	250				400		
		COSTES		417	0.017		500	0.020	
	ACEITE	CADA Km/s	15,000				15,000		
		IMPORTE	150				200		
		COSTES		250	0.010		333	0.013	
	RUEDAS	CADA Km/s	40,000				40,000		
		IMPORTE	300				400		
		COSTES		188	0.008		250	0.010	
	TOTAL VARIABLES			4,117	0.165		3,621	0.145	
TOTALES				6,910	0.276		7,994	0.320	

Tabla 11: Estimación de costes por kilómetro para vehículos ligeros

El coste total por kilómetro de un vehículo de gama media es aproximadamente igual a 0,276 €/km, mientras que el de gama alta asciende a 0,320 €/km. En el análisis se toma el valor medio de ambas cantidades, es decir, 0,298 €/km.



Con la ejecución del proyecto, los usuarios de la vía, debido a que la conducción es más eficiente, obtendrán los siguientes beneficios:

- Disminuye el consumo de combustible
- Se reducen los costes de mantenimiento y reparación del vehículo
- Se reduce del estrés en los usuarios de la vía
- Disminuye la contaminación acústica
- Disminuye la contaminación del aire
- Disminuye la emisión de los gases de efecto invernadero
- Mejora la seguridad vial
- Mejora la comodidad en la conducción

En las siguientes tablas se resume la estimación de costes con la ejecución del proyecto:

			Turismo gama media			Turismo gama alta		
			DATOS	COSTE ANUAL	POR Km	DATOS	COSTE ANUAL	POR Km
DATOS GENERALES	COMPRA		20,000			38,000		
	DURACION EN AÑOS		15			15		
	Km/s. ANUALES		25,000			25,000		
	TIPO DE INTERES REAL		1.00%			1.00%		
COSTES FIJOS	FINANCIEROS			200	0.008		380	0.015
	IMPUESTOS			60	0.002		60	0.002
	SEGUROS ANUALES			500	0.020		700	0.028
	GARAJE ANUAL			700	0.028		700	0.028
	OTROS							
	DEPRECIACION			1,333	0.053		2,533	0.101
	TOTAL FIJOS			2,793	0.112		4,373	0.175
COSTES VARIABLES	CONSUMO	COMBUSTIBLE	Gasoleo			Gasóleo		
		PRECIO	1.45			1.45		
		% CONSUMO	7.65%			6.00%		
		COSTES		2,773	0.111		2,175	0.087
	REVISION	CADA Km/s	15,000			20,000		
		IMPORTE	200			350		
		COSTES		333	0.013		438	0.018
	ACEITE	CADA Km/s	15,000			15,000		
		IMPORTE	150			200		
		COSTES		250	0.010		333	0.013
	RUEDAS	CADA Km/s	45,000			45,000		
		IMPORTE	300			400		
		COSTES		167	0.007		222	0.009
	TOTAL VARIABLES			3,523	0.141		3,168	0.127
TOTALES				6,316	0.253		7,541	0.302

Tabla 12: Estimación de reducción costes por kilómetro de los vehículos ligeros



Según un estudio publicado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, con la colaboración del Ministerio de Industria, Turismo y Fomento, una conducción eficiente, reduce en un 15 % en ahorro de carburantes; tomando valores más conservadores se elige un ahorro del 8%. Esto se verificará que cumple en el capítulo correspondiente a la simulación. Por esta razón el consumo medio por kilómetro reflejado en la tabla 6 es inferior al de la tabla 4. Con estas consideraciones el precio medio de viaje por kilómetro es igual a 0,277 €/km, por lo que se ha reducido en un 7% respecto a la situación sin proyecto.

			Vehículo pesado		
			DATOS	COSTE ANUAL	POR Km
DATOS GENERALES	COMPRA		155.000		
	DURACION EN AÑOS		17,5		
	Km/s. ANUALES		130.000		
	TIPO DE INTERES REAL		1,00%		
COSTES FIJOS	FINANCIEROS		SUELDOS	1.550	0,012
	IMPUESTOS			130	0,001
	SEGUROS ANUALES			1.200	0,009
	GARAJE ANUAL				0,000
	OTROS			4.200	0,032
	DEPRECIACION			8.857	0,068
	TOTAL FIJOS			15.937	0,123
COSTES VARIABLES	CONSUMO	COMBUSTIBLE	Gasoleo		
		PRECIO	1,45		
		% CONSUMO	24,75%		
		COSTES		46.654	0,359
	REVISION	CADA Km/s	30.000		
		IMPORTE	1.000		
		COSTES		4.333	0,033
	ACEITE	CADA Km/s	15.000		
		IMPORTE	400		
		COSTES		3.467	0,027
	RUEDAS	CADA Km/s	50.000		
		IMPORTE	2.000		
		COSTES		5.200	0,040
	TOTAL VARIABLES			59.654	0,459
TOTALES				75.591	0,580

Tabla 13: Estimación de reducción de costes por kilómetro de vehículos pesados

Se han realizado las siguientes suposiciones para el cálculo de la estimación:



La inversión necesaria ha aumentado debido a que es necesario instalarle el sistema de guiado y accionamiento para que el vehículo circule automáticamente. Se ha elegido como referencia el sistema de guiado de Google, que consta, como elemento principal, de un lidar, ya que permite una automatización total.

Todos los vehículos pesados pertenecen a compañías de transportes. Si una compañía tiene operando cincuenta vehículos necesitará los siguientes recursos en la situación sin proyecto:

	Número requerido	Sueldo medio (€)	Sueldo medio anual (€)	Total destinado a Sueldos (€)
<b>Conductores</b>	50	2000	24000	1200000
<b>Personal altamente cualificado</b>	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>N/A</b>	<b>N/A</b>	<b>1200000</b>

*Tabla 14: Necesidades de personal de una empresa tipo con 50 vehículos sin el proyecto.*

El sueldo medio de un transportista es de 2.000 € mensuales, por lo que los costes anuales de personal ascienden a 1.200.000 €. Esto hace que el coste anual por vehículo debido al personal de transporte sea igual a 24.000 €.

Sin embargo, al automatizar el transporte, la necesidad de una persona física para conducir el vehículo, desaparece. En contrapartida, se necesitará personal altamente cualificado para realizar el mantenimiento de los sistemas de guiado y accionamiento automático. La estimación de recursos necesarios se resume en la siguiente tabla:

	Número requerido	Sueldo medio (€)	Sueldo medio anual (€)	Total destinado a Sueldos (€)
<b>Conductores</b>	0	0	0	0
<b>Personal altamente cualificado</b>	7	2500	30000	210000
<b>TOTAL</b>	<b>11</b>	<b>N/A</b>	<b>N/A</b>	<b>210000</b>

*Tabla 15: Necesidades de personal de una empresa tipo con 50 vehículos con el proyecto.*

Los costes anuales con esta alternativa son 210000 €, por lo que se reduce en un 43,3% los gastos de personal. Además al poder circular los vehículos sin descanso, la intensidad de uso de los mismos aumenta un 30%. Con todo esto el precio medio por kilómetro es igual a 0.580 €/km, por lo que se reducirá en un 30% respecto a la situación actual.



## ESTIMACIÓN DE LA VALORACIÓN MONETARIA DEL TIEMPO

Para determinar cómo valorar los ahorros de tiempo, se tienen las opciones siguientes:

Realizar un estudio específico para los usuarios del caso particular evaluado. Esta es la mejor opción siempre que se disponga de recursos financieros y tiempo suficiente.

Cuando lo anterior no es posible se pueden aplicar valores recomendados a nivel nacional o internacional para la evaluación social de proyectos de transporte.

Si no existen tales recomendaciones, se puede intentar transferir datos de otros estudios o de países similares, realizando los ajustes que se consideren pertinentes. El problema de transferencia de valores entre países puede suavizarse de varias maneras, aunque una de las opciones más utilizadas consiste en ajustar de acuerdo con los niveles de renta per cápita reales expresados en paridad de poder adquisitivo (PPA)

En las siguientes tablas se muestran valores para España recogidos en el proyecto europeo HEATCO. Por falta de estudios específicos o recomendaciones nacionales, es por el momento la referencia más amplia y reciente.

	Autobús	Automóvil
<b>v (€/h)</b>	7,87	10,94
<b>v ajustado por PPA (€/h)</b>	9,14	12,71

*Tabla 16: Valor de los ahorros de tiempo en tiempo de trabajo en España para pasajeros. [Ministerio de Fomento]*

	Autobús	Automóvil
<b>v (€/h)</b>	17,93	22,34
<b>v ajustado por PPA (€/h)</b>	20,83	25,95

*Tabla 17: Valor de los ahorros de tiempo en tiempo de ocio en España [Ministerio de Fomento]*

	España	UE 25
<b>v (€/h)</b>	9,94	10,43
<b>v ajustado por PPA (€/h)</b>	11,55	10,43

*Tabla 18: Valor de los ahorros de tiempo en España para mercancías [Ministerio de Fomento]*





Para que los usuarios de la ruta actual encuentren atractivo dejar de viajar por ella y utilizar la ruta alternativa, tal como se explicó en apartados anteriores, debe cumplirse que el precio generalizado de la situación sin proyecto sea mayor que el de la situación con proyecto. Cuando se da esta situación el cambio en el excedente de los consumidores vendrá dado por:

$$\Delta EC = \frac{1}{2}(p_0 - p_1)(q_0 + q_1)$$

Donde  $q_0$  y  $q_1$  representan los correspondientes niveles de tráfico sin y con proyecto respectivamente.

Tal y como se demuestra en el apartado 4.2.2.4, el excedente de los productores viene dado por:

$$\Delta EP = Imp_1 q_1 - Imp_0 q_0 - (C_1 - C_0)$$

Teniendo en cuenta que en la Nacional II, en el tramo estudiado, no existen peajes, la expresión anterior queda de la siguiente forma:

$$\Delta EP = Imp_1 q_1 - (C_1 - C_0) = Imp_1 q_1 + C_0 - C_1$$

Los ingresos asociados a la explotación de la nueva vía vienen dados por  $Imp_1 \cdot q_1$ . Los costes de explotación y mantenimiento de la infraestructura se dividirán de la siguiente forma:

**Costes fijos:** Incluye los costes anuales asociados a la gestión y explotación de la infraestructura que no dependen del volumen de tráfico (mantenimiento y reparaciones periódicas, personal de vigilancia, etc.) Según la Asociación Española de la Carretera, un kilómetro de autovía supone un coste de mantenimiento medio de 42.000 €. La ruta nueva por tanto, tendrá unos costes fijos de 42.000 €/km. Como el tráfico de vehículos pesados se desvía completamente, los costes de mantenimiento de la Nacional II se reducen significativamente. Suponiendo una reducción del 40%, los costes de mantenimiento del tramo de estudio de la Nacional II serán iguales a 16800 €/km.

**Costes variables:** Están asociados al volumen de tráfico, como por ejemplo, los costes asociados a las casetas de cobro de peaje, cuando el número de estas varíe con la intensidad de tráfico. En el caso de la ruta actual se suponen igual a cero, mientras que para la nueva ruta se establece un importe unitario igual a  $k_1=0,1$  €/por vehículo.



Teniendo en cuenta lo anterior, los costes de operación y mantenimiento de la infraestructura para los escenarios sin y con proyecto pueden expresarse como:

$$C_0 = C_{0,F}$$

$$C_1 = C_{1,F} + C_{1,V} = C_{1,F} + 0,6 \cdot C_{0,F} + k_1 \cdot q_1$$

Por tanto el excedente de los productores es igual a:

$$\Delta EP = Imp_1 q_1 + 0,4 \cdot C_0 - C_{1,F} - k_1 \cdot q_1$$



## EXCEDENTE DE LOS CONTRIBUYENTES:

En el cálculo del VAN ha de tenerse en cuenta el cambio que se produce en la recaudación fiscal en el impuesto sobre el peaje como consecuencia de la realización de la nueva vía. Puesto que el tramo estudiado de la Nacional II es de libre acceso, el excedente de los contribuyentes con proyectos es igual a  $\alpha q_1$ . Siendo  $\alpha$  el impuesto sobre el importe del peaje.

## EFFECTOS EXTERNOS:

Las externalidades negativas deben añadirse a los costes, mientras que las externalidades positivas se sustraen de estos. La lista de efectos externos negativos que se derivan de los proyectos de transporte es amplia, debido a los numerosos impactos que la industria genera. Los problemas más evidentes, son la contaminación atmosférica y acústica generada por los vehículos. También la infraestructura de transporte en sí, tiene un impacto sobre el medio ambiente y sobre el bienestar de agentes que no son usuarios de dicha infraestructura.

Se consideran dos tipos de externalidades negativas:

El impacto medioambiental durante toda la vida del proyecto  $\epsilon$ , para cuyo cómputo se añadirá un 30% adicional a los costes de construcción presupuestados cada año. Se tiene en cuenta la destrucción del paisaje, el aumento de la contaminación debido al escape de gases de los vehículos hacia la atmósfera, la contaminación acústica, filtraciones de aceites en el suelo, etc.

Costes externos asociados a la congestión y los accidentes, que para la situación sin proyecto, se suponen iguales a  $\epsilon_0=0,30$  €/vehículo. Con la situación con proyecto, debido a la desviación y automatización del tráfico pesado, se reducen considerablemente tanto las congestiones como los accidentes de tráfico. Se considera una reducción del 60% en los mismos, por lo que  $\epsilon_1=0,18$  €/vehículo.

Hasta ahora no se ha tenido en cuenta el papel que juega la incertidumbre en el valor de lo expuesto hasta ahora. La existencia de la incertidumbre en los proyectos de inversión es inevitable, ya que se tienen que realizar muchas estimaciones que dependen de la persona que las realiza. Por esto en el siguiente apartado se expondrá cuáles son las variables a las que se les ha asociado incertidumbre y la función de distribución de probabilidad que las caracteriza.



### 4.5.3 Incertidumbre: Definición de variables aleatorias.

Debido a las estimaciones que se tienen que hacer en sus valores, se considerarán las siguientes fuentes posibles de incertidumbre, las cuáles no están relacionadas entre sí:

- Demanda futura
- Desviación del coste de construcción
- Valor del tiempo
- Probabilidad de que un vehículo no realice la ruta en su totalidad

#### 4.5.3.1 Demanda futura

A pesar de los miles de estudios publicados en relación con la predicción de la demanda de transporte, el número de artículos dedicados a analizar el grado de error de dichas predicciones es realmente escaso.

Bent Flyvbjerg, conjuntamente con otros autores, ha llevado a cabo un amplio estudio que presenta resultados significativos acerca de las predicciones de tráfico en proyectos de infraestructura de transporte. Estos autores fundamentan su trabajo en 170 proyectos de carretera. Analizaron la demanda en autopistas con y sin peajes.

El error de predicción se define como la variación porcentual entre el tráfico estimado y el tráfico observado en el primer año de operación. En la estimación del tráfico no se toman en consideración estimaciones posteriores del tráfico cuando ha sido modificada alguna de las condiciones iniciales o se dispone de información adicional.

Los errores de las predicciones realizadas para los proyectos de transporte por carretera son significativos; en un 50% de los proyectos la diferencia entre el tráfico estimado y el tráfico real es de aproximadamente de  $\pm 20\%$ . No se observa una diferencia significativa para la desviación estándar en las predicciones de demanda de carretera.

Por otro lado, no se tienen indicios de que las predicciones de tráfico hayan mejorado a lo largo del tiempo. La mejora en los modelos de demanda estimados no parece haber repercutido en una mejora de las predicciones. Además, se observa que los errores de predicción no guardan ninguna relación con el plazo de la construcción del proyecto y sólo aparece una relación muy débil con el coste del mismo.

Los trabajos realizados por Robert Bain investigan los errores de predicción en los proyectos de autopistas de peajes y los compara con los habidos en los proyectos



de carreteras sin peaje. El error de predicción se mide como la diferencia porcentual entre el tráfico real y el tráfico estimado en el primer año de operación del proyecto.

En estos trabajos se pone de manifiesto que la estimación de la demanda en las autopistas de peaje tiende a sobrestimar el tráfico. El porcentaje de sobrestimación se sitúa entre un 20% y un 30%. Además, el autor comprueba que la desviación estándar es elevada y muy similar tanto en autopistas de peaje como en las carreteras libres.

Al igual que en el caso de la investigación realizada por Flyvbjerg, se observa que el grado de acierto en las predicciones no mejora a lo largo del tiempo.

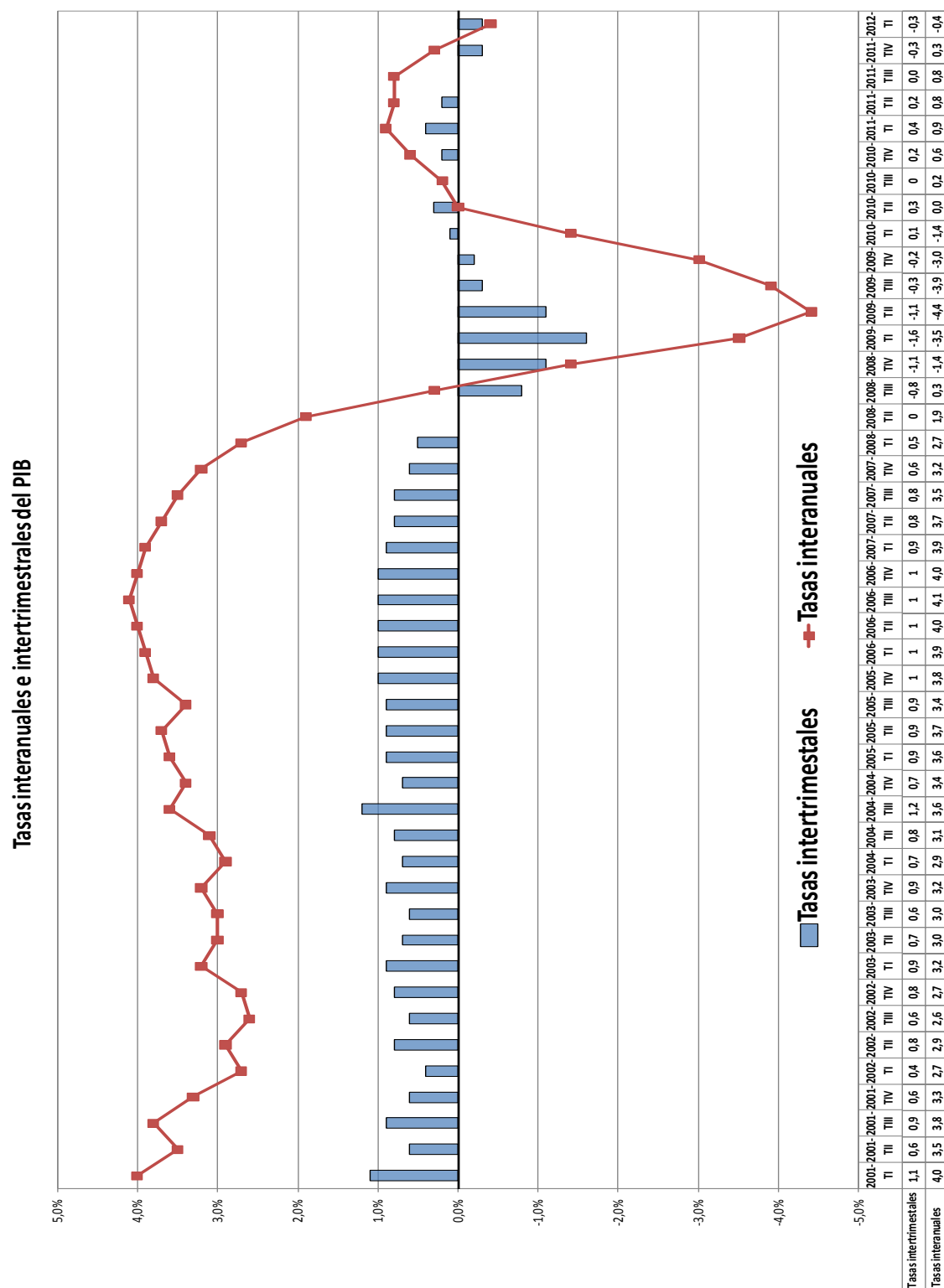
Para reducir la incertidumbre en la predicción de la demanda se recurrirá a analizar el número de vehículos matriculados, la demanda de la infraestructura del tramo de estudio, la evolución de los últimos años del PIB, del IPC, la tasa de paro y la tasa de ocupados.

El Producto Interior Bruto (PIB) mide el valor monetario de la producción de bienes y servicios finales de un país a lo largo de un periodo determinado (trimestral y anual). Otra definición: es el conjunto de todos los bienes y servicios finales producidos por un país durante un año.

Como se observa en el gráfico la variación interanual del PIB se mantiene aproximadamente entre un 3% y un 4% durante el periodo comprendido entre el año 2001 y el segundo trimestre del año 2007. A partir de esta fecha la tasa de crecimiento interanual decrece hasta alcanzar su valor mínimo del -4,4% en el segundo trimestre del año 2009. Hasta el segundo trimestre del año 2010 el PIB sigue disminuyendo. Desde este cuatrimestre hasta el último cuatrimestre del 2011 el PIB crece. Sin embargo, durante el primer cuatrimestre del año 2012 el PIB presenta unos valores negativos de crecimiento.

Según el Fondo Monetario Internacional (FMI), la economía española se contraerá un 1,7% en 2012. Las predicciones de este organismo de contracción para el 2013 son del 1,2 %. Sin embargo, el Gobierno de España prevé una caída del 0,5%. A partir de 2014 la economía española experimentará un crecimiento, se estima que este será de un 0,9 %.

En el contexto internacional, las predicciones del FMI son las siguientes: La economía alemana crecerá un 0.9 tanto en 2012 como en 2013. La economía en la zona euro se contraerá un 0,4% este año. En el año 2013 se estima que crecerá un 0,2%. Para el conjunto de la economía mundial se prevé un crecimiento del 3,3% para este año y un 3,6% para el próximo ejercicio.



El Índice de Precios de Consumo (IPC) español muestra la evolución de los precios de una serie de productos que adquieren los hogares españoles para su consumo. Cuando la variación del IPC respecto al ejercicio anterior es positiva se habla de inflación, mientras que cuando la variación es negativa es deflación.

Como se observa en la figura 24, el aumento del IPC desde el año 2002 hasta el 2008 se mantuvo entre el 2,8 % y el 4,1%. En 2009 disminuyó un 0,3%, para volver a crecer desde el 2010 hasta la actualidad. Los grupos con mayor influencia en este aumento son:

- Medicina: El aumento de precios en los medicamentos debido a la variación rúbrica de medicamentos y otros productos farmacéuticos, como resultado de la entrada en vigor de cambios en la normativa específica de su financiación.
- Transporte: Su variación aumenta debido al incremento en el precio de los carburantes y lubricantes.
- Aumento de los precios de la electricidad.

La media anual del crecimiento del IPC en España cuando finalice el año 2012 es del 1,8%, según la previsión realizada por la Fundación de las Cajas de Ahorros (FUNCAS). Para el 2013 prevé un crecimiento medio anual del 1,2%.

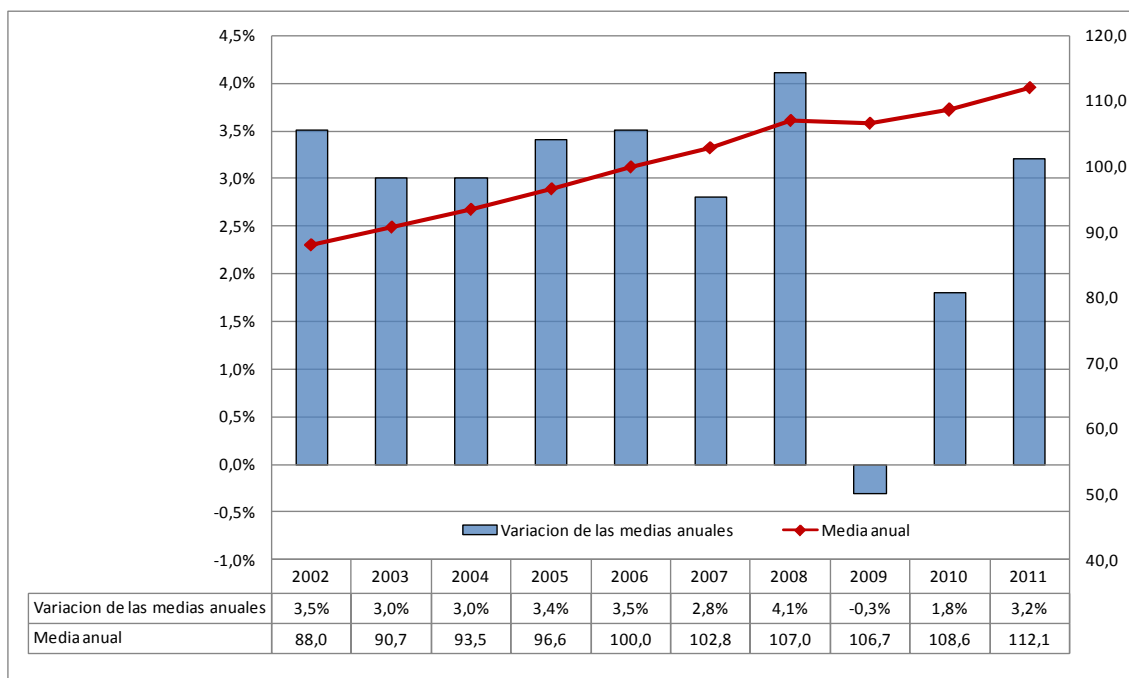
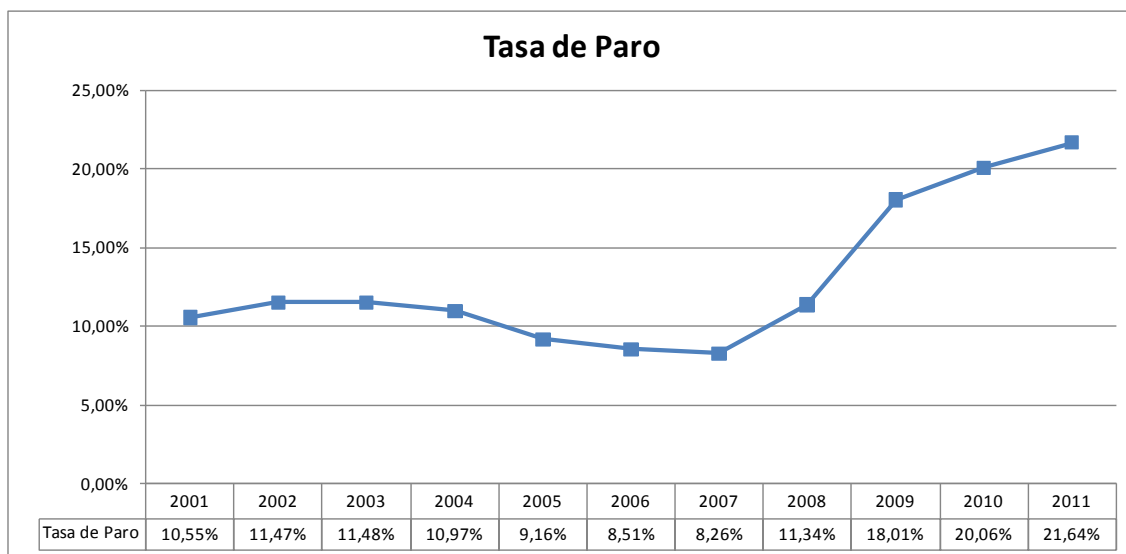


Figura 47: Evolución del IPC periodo 2002-2011 [Datos INE]

Como se observa en la siguiente figura, la tasa de paro en España ha aumentado cinco años consecutivos. En el año 2007 se situó en el 8,26%, mientras que en el 2011 subió al 21,64%. En el segundo trimestre de 2012 el paro registró un valor del 24,63%, en el tercer trimestre alcanzó el 25,02%. Las previsiones del Gobierno de España de la tasa de paro la sitúan en el 24% en 2013. Sin embargo, según el último número de “Situación de España” de BBVA Research, la tasa de paro se situará en el 26%, a pesar de la caída esperada de la población activa.



*Figura 48: Tasa de Paro. [Datos INE]*

En la siguiente tabla se muestra el histórico de las matriculaciones de vehículos pesados. Están contabilizándose camiones de más de 3500 de MMA (Masa Máxima Autorizada), los de menos de 3500 kg de MMA, las furgonetas y los autobuses.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Camiones y furgonetas	287441	273127	306699	343978	391295	397561	396370	220539	136433	145093	132682
Autobuses	3503	3145	3290	3659	4175	3847	4216	3869	2967	2593	2859
Total Vehículos Pesados	290944	276272	309989	347637	395470	401408	400586	224408	139400	147686	135541
Variación		-5%	12%	12%	14%	2%	0%	-44%	-38%	6%	-8%

*Tabla 19: Matriculación de vehículos pesados. [Datos DGT]*

Se observa un gran descenso en la matriculación de vehículos pesados en el periodo 2008-2009. Coincide con la contracción de la economía descrita anteriormente. En el segundo trimestre de 2009 se alcanzó el menor valor de la tasa interanual del PIB de los últimos cuarenta años. La tasa de decrecimiento más grande registrada hasta desde 1970 hasta el año 2008, fue la del primer trimestre de 1993, que alcanzó un valor del -2,5%. En 2010 la economía española remonta hasta el segundo trimestre de 2011, que empieza otra vez a contraerse. De la misma manera, la matriculación de vehículos



pesados aumenta un 6% en 2010 y disminuye un 8% en 2011 respecto al año anterior. De aquí se deduce que la matriculación de vehículos pesados, está estrechamente relacionada con la situación en la que se encuentra la economía.

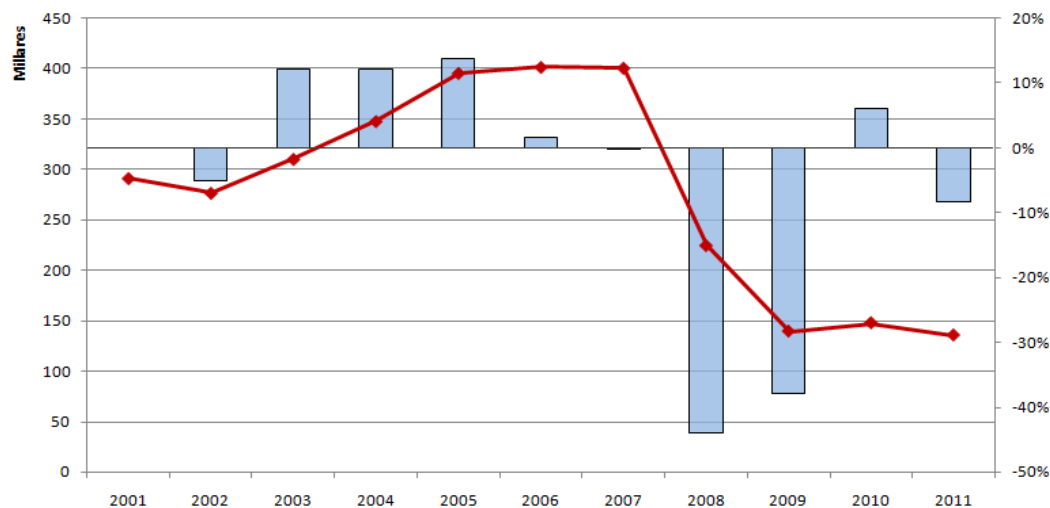


Figura 49: Matriculación de vehículos pesados [Datos DGT]

A partir del año 2009, las bajas de vehículos pesados son superiores que los vehículos matriculados. Por tanto hay un menor número de vehículos pesados en circulación desde dicho año, esto hace que la demanda de transporte de estas características disminuya.

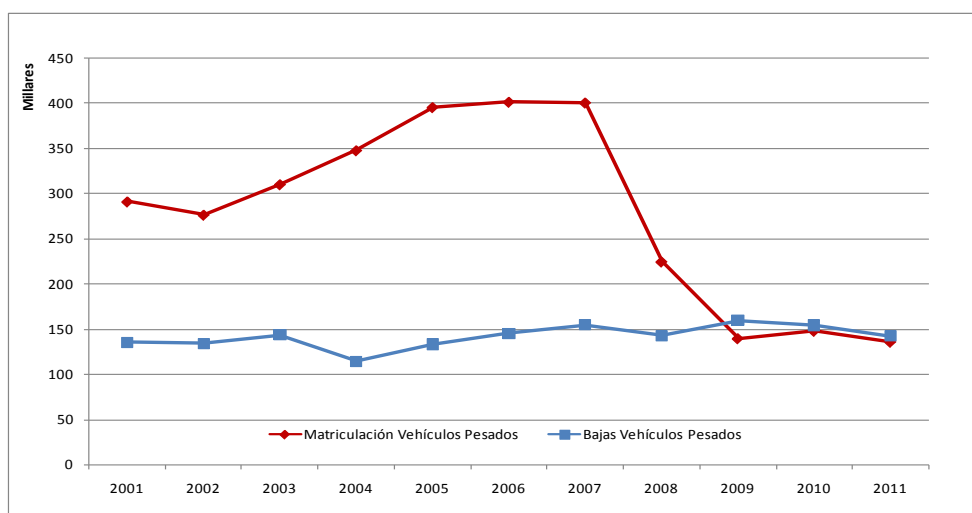


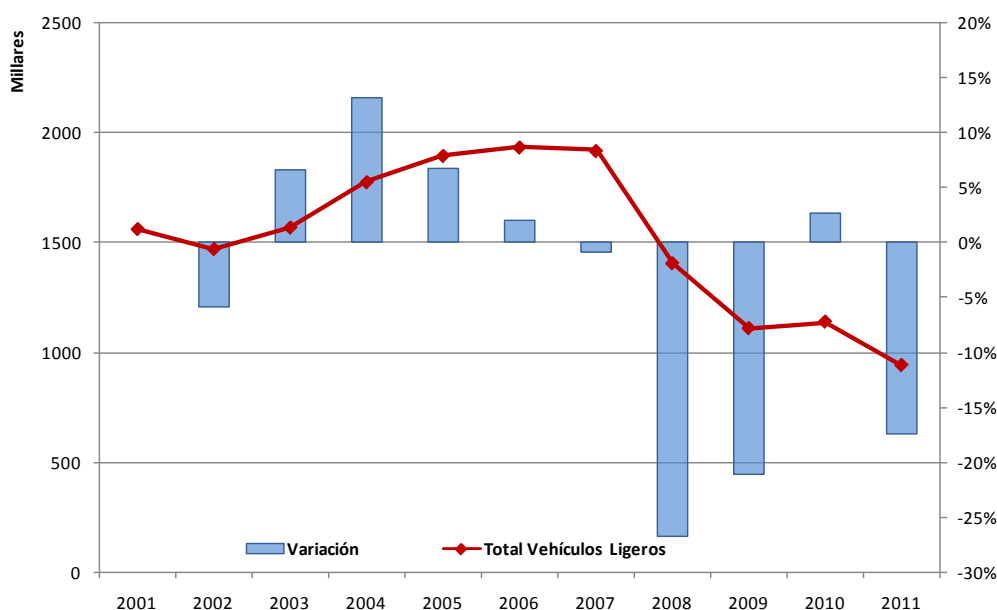
Figura 50: Matriculación versus bajas vehículos ligeros. [Datos DGT]

En la siguiente tabla se muestra el número de vehículos ligeros matriculados durante el periodo 2001-2011. Los vehículos que se tienen en consideración son turismos y motos.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Turismos	1498849	1408426	1492527	1653798	1676707	1660627	1633806	1185438	971177	1000010	817688
motos	64196	63416	77496	123195	220424	274918	285633	221772	139908	141030	125059
<b>Total Vehículos Ligeros</b>	<b>1563045</b>	<b>1471842</b>	<b>1570023</b>	<b>1776993</b>	<b>1897131</b>	<b>1935545</b>	<b>1919439</b>	<b>1407210</b>	<b>1111085</b>	<b>1141040</b>	<b>942747</b>
Variación		-6%	7%	13%	7%	2%	-1%	-27%	-21%	3%	-17%

*Tabla 20: Matriculación de vehículos ligeros. [Datos DGT]*

Se deduce, que al igual que en el caso de los vehículos pesados, la matriculación de vehículos ligeros está relacionada con el PIB. En el periodo 2008-2009 hubo un gran descenso en la matriculación de vehículos, remontó en 2010, para volver a caer en 2011.



*Figura 51: Matriculación de vehículos ligeros [Datos DGT]*

Tal como se muestra en la figura siguiente, el número de vehículos dados de baja fue inferior al de matriculados. Por tanto, centrándose en el año 2011, aunque el número de matriculaciones disminuyó, al hacerlo también el número de bajas y ser inferior al de matriculados, la cantidad de vehículos en circulación aumenta. Esto hace que la demanda de transportes aumente cada año más, aunque en menor medida que antes del año 2007, donde el número de vehículos matriculados aumentó mientras que las bajas permanecían prácticamente constantes.

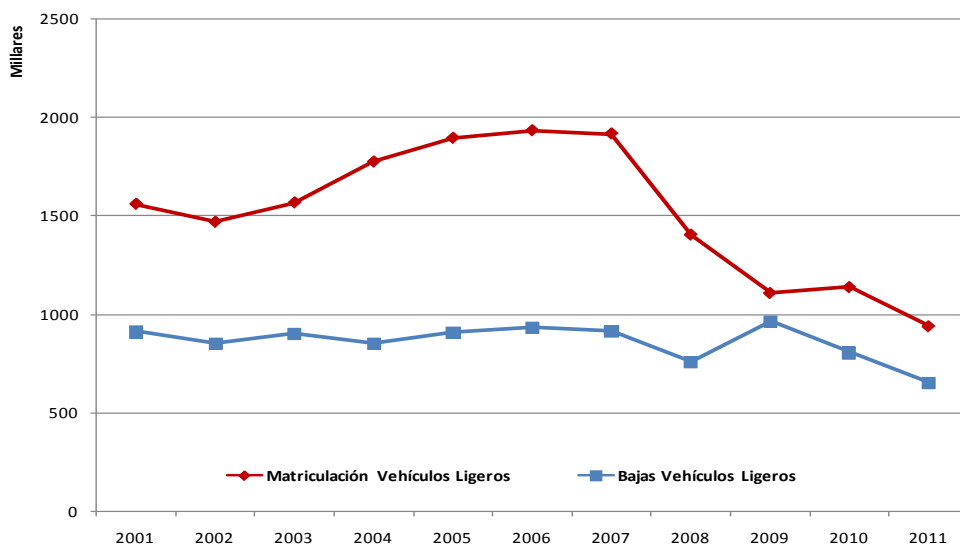


Figura 52: Matriculación versus bajas vehículos ligeros. [Datos DGT]

Por último se analizará la variación de la intensidad media diaria (IMD) en función de los indicadores económicos. En la siguiente figura se muestra gráficamente dicha variación:

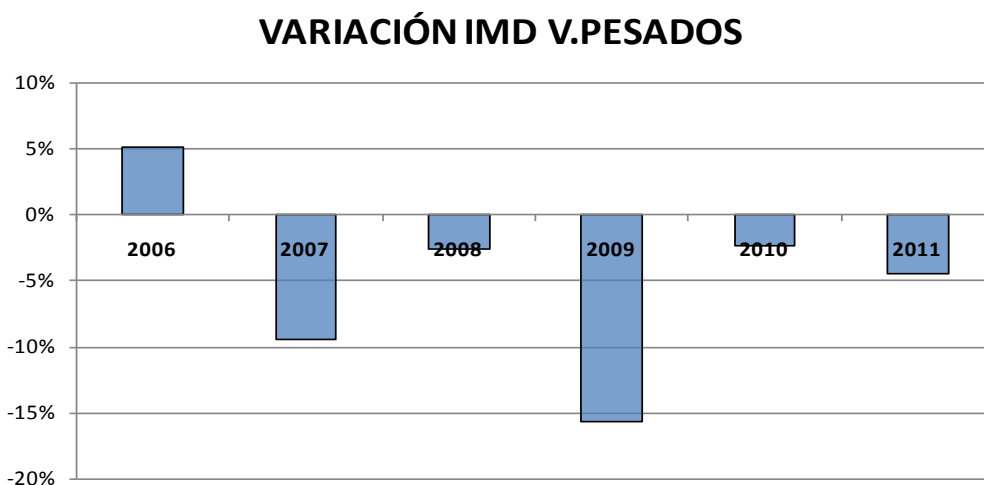


Figura 53: Variación anual del IMD en el tramo de estudio

Como se observa en la figura anterior, la variación de la demanda a partir del año 2007 presenta valores negativos todos los años. En el año 2009 se registra la mayor disminución de demanda del tramo de estudio, coincidiendo con la tasa mínima interanual del PIB. En 2010 mejora la situación a la vez que se produce un crecimiento de la economía. En 2011 vuelve a empeorar respecto al año anterior. Por tanto, se puede suponer que la demanda del tramo de estudio está íntimamente relacionada con la situación económica.



Siguiendo las previsiones del FMI, que estiman que a partir de 2014 la economía española volverá a crecer, y teniendo en cuenta que el número de vehículos matriculados y la IMD del tramo de estudio, están estrechamente relacionados con el PIB, se puede deducir que a partir del año 2014 las matriculaciones y la demanda crecerán. Además el número de bajas decrecerá. Un descenso en las matriculaciones y aumento en las bajas por encima de éstas, implica que la demanda de transporte disminuye. Por el contrario, si el número de matriculaciones aumenta y las bajas disminuyen, la demanda de transporte por carretera aumenta. Atendiendo a los gráficos anteriores y lo expuesto en este párrafo, se puede concluir que a partir de 2014 la demanda de ambos tipos de transporte por carretera aumentará.

Tal como se muestra en la *tabla 7*, la intensidad media diaria del tramo de estudio de la Nacional II es igual a 19851 vehículos. El 26% de los vehículos corresponde a vehículos pesados, esto es 5102 vehículos, mientras que el 74% restante del tráfico es de vehículos ligeros. Con la ejecución del proyecto se desviaría la totalidad del tráfico pesado a la nueva vía. El volumen del tráfico, siendo conservadores, crecerá anualmente a una tasa anual que se distribuye uniformemente entre el 0,5% y el 1,5%.

#### **4.5.3.2 Desviación del coste de construcción**

Existe una amplia experiencia documentada que demuestra que la mayoría de las inversiones en materia de transportes presentan un sesgo optimista hacia la subestimación de los costes. Estas desviaciones se mantienen para periodos de tiempos largos, con lo que se puede afirmar que se trata de un sesgo sistemático. Por tanto, se refuerza la idea de incorporar la incertidumbre al proceso de evaluación desde un principio, utilizando distribuciones de probabilidad para modelizar posibles desviaciones al alza en los costes de inversión inicial, en relación a las cifras inicialmente presupuestadas.

Una de las formas de abordar de manera práctica esta cuestión consiste en utilizar el procedimiento denominado Reference Class Forecasting, que consta principalmente de tres etapas: En primer lugar, se han de identificar un número suficiente de proyectos pasados con características similares al proyecto evaluado. A continuación se estiman las distribuciones de probabilidad de los costes. Por último se compara el proyecto con la distribución obtenida.

La parte más complicada de este procedimiento es la recopilación de las bases de datos necesarias para establecer las referencias. Aplicando esta aproximación podría proponerse aumentar los costes de capital en un porcentaje determinado. Según la publicación de agosto de 2006 del Project Management Journal, basándose en la base de datos de proyectos de infraestructuras Flyvbjerg, la media del aumento

de costes de construcción en proyectos de transportes de mercancías es del 20,4% con una desviación estándar del 0,3%.

Para tener en cuenta esto, se definirá una variable aleatoria que refleja el porcentaje de desviación en los costes de inversión, cuya distribución de probabilidad es normal, con una media igual a 20,4% y una desviación del 0,3%. De esta forma, el importe de la inversión en  $t=0$ ,  $t=1$  y  $t=2$ , será igual a  $I_t(1+\zeta)$ . Con esto el VAN social y el financiero quedan de la siguiente forma:

$$VAN_s = - \sum_{t=0}^2 \frac{I_t(1+\zeta) + E_t}{(1+i)^t} + \sum_{t=3}^{40} \frac{\Delta EC_t + \Delta EP_t + \alpha_1 q_{1t} - \alpha_0 q_{0t} - \varepsilon_1 q_{1t} + \varepsilon_0 q_{0t}}{(1+i)^t}$$

*Ecuación 47: VAN social teniendo en cuenta las desviaciones en los costes de construcción*

$$VAN_f = - \sum_{t=0}^2 \frac{I_t(1+\zeta)}{(1+i)^t} + \sum_{t=3}^{40} \frac{Imp_1 q_{1t} - (C_{1t} - C_{0t})}{(1+i)^t}$$

*Ecuación 48: VAN financiero teniendo en cuenta las desviaciones en los costes de construcción*

#### 4.5.3.3 Valor del tiempo

Se ha considerado al valor del tiempo como variable aleatoria ya que es muy complicado saber con exactitud su magnitud real. Pese a tener los datos que aporta el proyecto HEATCO descritos anteriormente, se considerará el valor del tiempo como una variable aleatoria que sigue una distribución uniforme entre 9,94 y 11,55 euros por vehículo y por hora.

#### 4.5.3.4 Probabilidad de que un vehículo realice la ruta en su totalidad

Se ha definido esta variable para tener en cuenta que no todos los vehículos van a realizar la ruta entera. Esta variable sigue una distribución triangular entre 0% y 100% y con valor más probable 50%.

Se ha seleccionado una distribución triangular ya que no se tiene información empírica, y al tener tres parámetros simples es muy flexible para modelizar una amplia variedad de supuestos. La elección del valor más probable es subjetiva, en este proyecto se entiende que los vehículos no se incorporan/desincorporan de la vía en el mismo punto. Se ha supuesto que sólo la mitad de los vehículos realizan la ruta completa, por esta razón el valor más probable es el 50%.



## RESUMEN DE LAS PRINCIPALES VARIABLES Y PARÁMETROS

En el siguiente cuadro se resumen los valores de las variables aleatorias en función de lo descrito anteriormente:

Variable	Descripción	Valor asignado	Unidad de medida
I	Coste total de construcción del proyecto	1139,88	millones €
I <sub>0</sub>	Inversión presupuestada en t=0 (60%)	683,928	millones €
I <sub>1</sub>	Inversión presupuestada en t=0 (20%)	227,976	millones €
I <sub>2</sub>	Inversión presupuestada en t=0 (20%)	227,976	millones €
ζ	Desviación sobre los costes de construcción presupuestados	Variable aleatoria con distribución normal con media 20,04 y desviación estándar 0,30	% sobre la inversión
T	Duración total del proyecto	40	años
VR	Valor residual de la infraestructura	20	% sobre la inversión
i	Tasa de descuento real	5	%
L <sub>0</sub>	Longitud total del tramo actual de la Nacional II	240	km
L <sub>1</sub>	Longitud total del tramo del proyecto	230	km
t <sub>0</sub>	Tiempo de viaje de la ruta actual	3,692307692	horas
t <sub>1</sub>	Tiempo de viaje de la ruta del proyecto	3,285714286	horas
v	Valor del tiempo (por vehículo)	Variable aleatoria con distribución uniforme entre 9,94-11,55	€/hora
Imp <sub>1</sub>	Peaje neto medio de la ruta	55	€
z <sub>0</sub>	Coste operativo medio de un vehículo en la ruta actual	0,83	€/km
z <sub>1</sub>	Coste operativo medio de un vehículo en la ruta nueva	0,58	€/km
α	Impuesto sobre el peaje (21%)	11,55	€
θ	Tasa de crecimiento de la demanda	Variable aleatoria con distribución uniforme entre 0,5-1,5	%
C <sub>0,f</sub>	Coste fijo anual ruta actual	42000	€/km
C <sub>1,f</sub>	Coste fijo anual ruta nueva	72700	€/km
k <sub>0</sub>	Coste variable anual ruta actual	0	€/km
k <sub>1</sub>	Coste variable anual ruta nueva	0,6	€/vehículo
E	Coste del impacto ambiental durante todo el proyecto	30	% sobre la inversión
ε <sub>0</sub>	Coste de externalidades negativas ruta actual	0,3	€/vehículo
ε <sub>1</sub>	Coste de externalidades negativas ruta nueva	0,18	€/vehículo
Y	Porcentaje de vehículos que realizan la ruta nueva completa	Variable aleatoria con distribución triangular entre 0-100 y valor esperado 50	% sobre la demanda

*Tabla 21: Resumen de las principales variables del proyecto*



#### 4.5.3.5 Cálculo y discusión del VAN social y financiero del proyecto

A partir de la información contenida en la tabla anterior se ha procedido a calcular el VAN social y financiero asociado al proyecto. Para ello se han realizado 50000 extracciones de las cuatro variables aleatorias que se han asociado al modelo de simulación de estudio del proyecto. Con cada una de estas extracciones se ha procedido al cálculo del VAN social y del financiero del proyecto, lo cual permite obtener las funciones de probabilidad de estos. A partir de las cuales se procederá a la evaluación de la conveniencia o no de realizar el proyecto.

En esta página y en las siguientes se presentan de manera detallada los resultados obtenidos en la evaluación económica del proyecto de estudio.

t	Inversión prevista	Impacto ambiental	Variación excedente consumidor	Variación excedente productor	Variación excedente contribuyentes	Variación costes externos	Beneficios sociales	Beneficio comercial
0	-823.446.818	-205.178.400					-1.028.625.218	-823.446.818
1	-274.490.221	-68.392.800					-342.883.021	-274.490.221
2	-274.490.221	-68.392.800					-342.883.021	-274.490.221
3			33.352.028	88.170.287	25.554.458	258.855	147.335.628	88.170.287
4			33.519.758	89.119.142	25.810.216	254.870	148.703.986	89.119.142
5			33.689.167	90.077.493	26.068.534	250.845	150.086.040	90.077.493
6			33.860.272	91.045.436	26.329.437	246.780	151.481.925	91.045.436
7			34.033.089	92.023.066	26.592.951	242.675	152.891.781	92.023.066
8			34.207.636	93.010.481	26.859.103	238.528	154.315.748	93.010.481
9			34.383.930	94.007.778	27.127.918	234.340	155.753.966	94.007.778
10			34.561.988	95.015.056	27.399.424	230.110	157.206.578	95.015.056
11			34.741.828	96.032.416	27.673.647	225.837	158.673.728	96.032.416
12			34.923.468	97.059.958	27.950.615	221.522	160.155.563	97.059.958
13			35.106.926	98.097.783	28.230.354	217.164	161.652.228	98.097.783
14			35.292.220	99.145.996	28.512.894	212.761	163.163.872	99.145.996
15			35.479.369	100.204.699	28.798.261	208.315	164.690.645	100.204.699
16			35.668.391	101.273.999	29.086.484	203.825	166.232.699	101.273.999
17			35.859.304	102.354.000	29.377.592	199.289	167.790.186	102.354.000
18			36.052.129	103.444.810	29.671.613	194.708	169.363.260	103.444.810
19			36.246.883	104.546.538	29.968.577	190.082	170.952.079	104.546.538
20			36.443.586	105.659.292	30.268.513	185.408	172.556.800	105.659.292
21			36.642.258	106.783.183	30.571.451	180.689	174.177.580	106.783.183
22			36.842.918	107.918.322	30.877.421	175.922	175.814.583	107.918.322
23			37.045.587	109.064.822	31.186.453	171.107	177.467.969	109.064.822
24			37.250.284	110.222.797	31.498.578	166.244	179.137.902	110.222.797
25			37.457.029	111.392.361	31.813.827	161.332	180.824.549	111.392.361
26			37.665.844	112.573.630	32.132.231	156.371	182.528.077	112.573.630
27			37.876.749	113.766.722	32.453.822	151.361	184.248.653	113.766.722
28			38.089.764	114.971.755	32.778.631	146.300	185.986.451	114.971.755
29			38.304.912	116.188.848	33.106.691	141.189	187.741.640	116.188.848
30			38.522.212	117.418.123	33.438.034	136.026	189.514.396	117.418.123
31			38.741.688	118.659.700	33.772.694	130.812	191.304.895	118.659.700
32			38.963.360	119.913.704	34.110.703	125.546	193.113.313	119.913.704
33			39.187.251	121.180.258	34.452.095	120.227	194.939.831	121.180.258
34			39.413.382	122.459.488	34.796.904	114.855	196.784.629	122.459.488
35			39.641.777	123.751.521	35.145.163	109.429	198.647.891	123.751.521
36			39.872.458	125.056.485	35.496.909	103.949	200.529.800	125.056.485
37			40.105.447	126.374.510	35.852.174	98.414	202.430.545	126.374.510
38			40.340.768	127.705.726	36.210.995	92.823	204.350.313	127.705.726
39			40.578.444	129.050.266	36.573.408	87.177	206.289.294	129.050.266
40	227.976.000		40.818.499	130.408.262	36.939.447	81.474	436.223.682	130.408.262

Tabla 22: Componentes de los beneficios sociales mediante la aproximación del cambio en los excedentes



En el siguiente cuadro se recogen los valores esperados del VAN social y financiero desde el inicio del proyecto hasta el final.

Año	VAN social	VAN financiero
0	-1.028.625.218	-823.446.818
1	-1.355.172.906	-1.084.866.076
2	-1.666.170.705	-1.333.836.798
3	-1.538.896.650	-1.257.671.989
4	-1.416.557.512	-1.184.353.450
5	-1.298.961.173	-1.113.775.377
6	-1.185.923.028	-1.045.835.871
7	-1.077.265.694	-980.436.796
8	-972.818.721	-917.483.642
9	-872.418.326	-856.885.390
10	-775.907.124	-798.554.387
11	-683.133.882	-742.406.223
12	-593.953.272	-688.359.607
13	-508.225.644	-636.336.258
14	-425.816.801	-586.260.792
15	-346.597.785	-538.060.619
16	-270.444.671	-491.665.833
17	-197.238.369	-447.009.122
18	-126.864.436	-404.025.666
19	-59.212.893	-362.653.051
20	5.821.950	-322.831.175
21	68.341.663	-284.502.167
22	128.443.855	-247.610.302
23	186.222.333	-212.101.926
24	241.767.248	-177.925.374
25	295.165.239	-145.030.901
26	346.499.569	-113.370.610
27	395.850.262	-82.898.385
28	443.294.222	-53.569.822
29	488.905.362	-25.342.168
30	532.754.720	1.825.737
31	574.910.566	27.973.527
32	615.438.517	53.139.356
33	654.401.636	77.359.962
34	691.860.535	100.670.713
35	727.873.467	123.105.662
36	762.496.424	144.697.591
37	795.783.219	165.478.064
38	827.785.574	185.477.465
39	858.553.203	204.725.050
40	920.516.893	223.248.981

Tabla 23: VAN social y VAN financiero esperados





A continuación se muestran los valores del VAN social y del VAN financiero y sus probabilidades de ocurrencia que se han obtenido para el año 40 del proyecto:

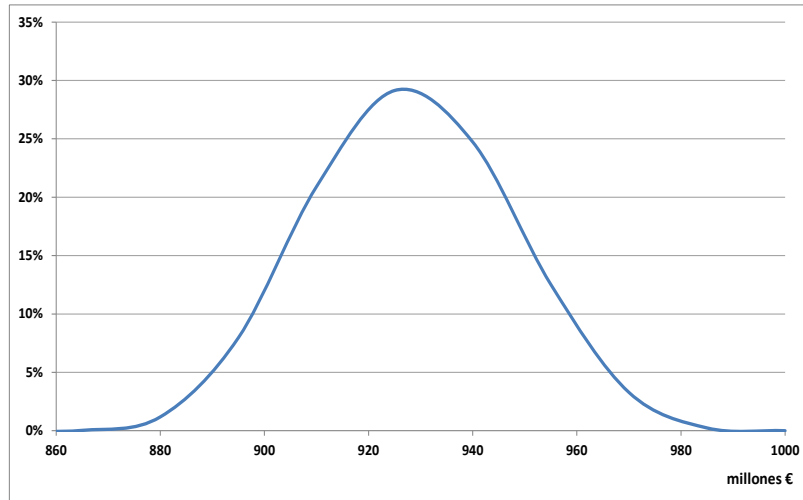
Valor VAN social	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada
850	0	0%	0%
865	15	0%	0%
880	592	1%	1%
895	3983	8%	9%
910	10453	21%	30%
925	14569	29%	59%
940	12365	25%	84%
955	6263	13%	96%
970	1641	3%	100%
985	119	0%	100%
1000	0	0%	100%
1015	0	0%	100%
1030	0	0%	100%
1045	0	0%	100%
<b>Total iteraciones</b>	<b>50000</b>		

*Tabla 24: Valores del VAN social y probabilidades para el año 40*

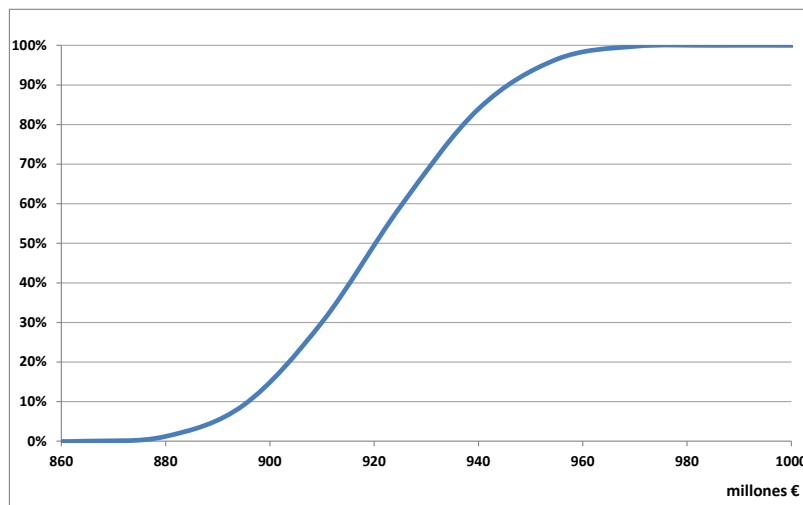
Valor VAN financiero	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada
-400	0	0,00%	0,00%
-350	0	0,00%	0,00%
-300	0	0,00%	0,00%
-250	0	0,00%	0,00%
-200	140	0,28%	0,28%
-150	703	1,41%	1,69%
-100	1302	2,60%	4,29%
-50	1990	3,98%	8,27%
0	2544	5,09%	13,36%
50	3103	6,21%	19,56%
100	3675	7,35%	26,91%
150	4170	8,34%	35,25%
200	4927	9,85%	45,11%
250	5187	10,37%	55,48%
300	4919	9,84%	65,32%
350	4202	8,40%	73,72%
400	3689	7,38%	81,10%
450	2992	5,98%	87,09%
500	2523	5,05%	92,13%
550	1835	3,67%	95,80%
600	1257	2,51%	98,32%
650	714	1,43%	99,74%
700	128	0,26%	100,00%
750	0	0,00%	100,00%
800	0	0,00%	100,00%
850	0	0,00%	100,00%
<b>Total iteraciones</b>	<b>50000</b>		

*Tabla 25: Valores del VAN financiero y probabilidades para el año 40*

Las siguientes figuras muestran la distribución de probabilidad obtenida del VAN social del proyecto.



*Figura 54: Distribución de probabilidad del VAN social*



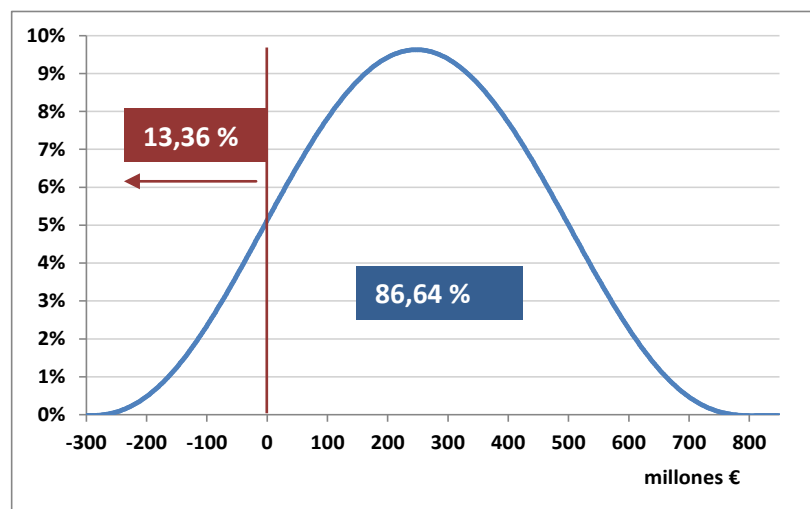
*Figura 55: Probabilidad acumulada VAN social*

Como puede observarse en la última fila de la *tabla 23*, los valores obtenidos en  $t=40$  para el VAN social y el VAN financiero a partir de los valores esperados de las variables aleatorias son positivos, lo que implica que, en principio, el proyecto debe ser llevado a cabo y que la participación privada de agentes neutrales al riesgo estaría asegurada.

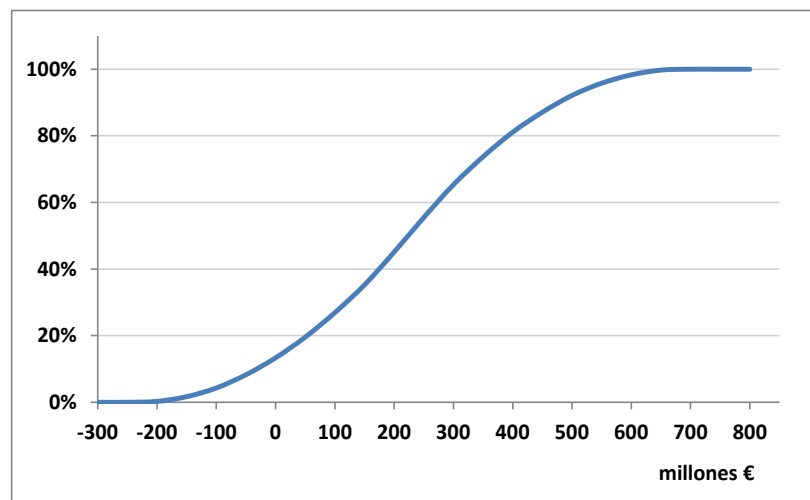
En la *figura 54* se representa la función de probabilidad del VAN social. Según los resultados obtenidos, la rentabilidad social esperada del proyecto es positiva y además el riesgo es nulo, debido a que la probabilidad de obtener resultados negativos es del 0%.

Con un VAN social esperado de 920 millones de euros este proyecto debería realizarse en principio si la decisión es la de aceptar-rechazar frente al caso base consistente en mantener únicamente la Nacional II para la circulación de todo tipo de vehículos.

En cuanto al VAN financiero, se obtuvieron las siguientes funciones de distribución:



*Figura 56: Función de distribución del VAN financiero*



*Figura 57: Probabilidad acumulada VAN financiero*



Como se observa en la figura anterior, El VAN financiero esperado de este proyecto es también positivo. Con los valores esperados de las variables aleatorias este proyecto permite la participación privada, ya que los inversores recuperarían la inversión inicial, la remuneración del capital al tipo de interés de mercado y además unos beneficios esperados de 223 millones de euros. Además el riesgo de obtener una rentabilidad negativa, igual al 13,36%, es relativamente bajo, por lo que los posibles inversores tendrán más interés en realizar una oferta para realizar el proyecto.

El riesgo del proyecto está relacionado fundamentalmente con los costes de inversión y con la demanda esperada. Si los costes se desviasen al alza, el VAN financiero podría ser negativo. Lo mismo sucedería si la demanda real fuese menor a la esperada. La naturaleza de los riesgos es diferente.

El riesgo de la demanda está prácticamente fuera del control del operador. La demanda crecerá, como se ha visto, en función de la evolución de la economía y de la situación general del país. Este riesgo, tal como se comentó anteriormente, surge del carácter fijo del plazo concesional. Por tanto, examinar alternativas de plazo variable en las que las empresas se esfuercen en reducir costes para ganar el concurso y posteriormente para obtener beneficios, y que no se perjudican por las fluctuaciones de la demanda. Esto puede ser una buena manera de asegurar la participación privada minimizando muchos de los inconvenientes que resultan en los concursos públicos de adjudicación y posterior control que no funcionan adecuadamente.

Los costes de inversión, los de mantenimiento y operación, sí dependen parcialmente del esfuerzo realizado por el concesionario. Se puede recompensar al operador para que construya y explote con mayor eficiencia la infraestructura, y así, reducir costes y, por tanto, reducir el riesgo.



# Capítulo 5: Simulación de tráfico



## 5.1 Introducción

Para la simulación del tráfico se va a utilizar el programa AIMSUN, la versión 7.0. Este programa se basa en el modelo de Gipps visto en el *apartado 4.5.2*, es decir, está enmarcado dentro de los modelos microscópicos de seguimiento de vehículos. AIMSUN soporta diferentes tipos de redes: urbanas, autopistas, carreteras de circunvalación, etc. Es un simulador dinámico que ha sido diseñado e implementado como una herramienta de análisis del tráfico para ayudar a los ingenieros de tráfico a diseñar los sistemas de tráfico.

AIMSUN puede realizar simulaciones microscópicas, lo que significa que el comportamiento de cada vehículo es constantemente modelado durante el periodo simulación mientras el vehículo viaja por la red del modelo. El microsimulador es una combinación de simulador continuo y discreto. Esto significa que hay algunos elementos del sistema que cambian sus estados constantemente en el tiempo de simulación, el cuál está dividido en pequeños intervalos de tiempo denominados ciclos de simulación o pasos. El sistema provee un alto detalle de modelo de la red de tráfico, ya que permite un amplio rango de geometrías.

### 5.1.1 Geometría de estudio

Se seleccionó un tramo de tres kilómetros de longitud dentro del tramo de estudio, ya que, por motivos de capacidad de cálculo de los ordenadores personales, no es posible modelar la ruta entera. El tramo seleccionado es el representado en la *figura 55*, se eligió este tramo debido a que presenta un alto porcentaje de vehículos pesados, por lo que es interesante ver cómo varían las siguientes variables si se desvían los vehículos pesados de la vía:

- Consumo de combustible
- Emisión de contaminantes (CO, HC y NOx)
- Tiempo de demora
- Tiempo de viaje
- Velocidad media
- Densidad



Figura 58: Tramo de simulación de tráfico

En la siguiente tabla se muestra la evolución del IMD del tramo seleccionado durante los últimos siete años:

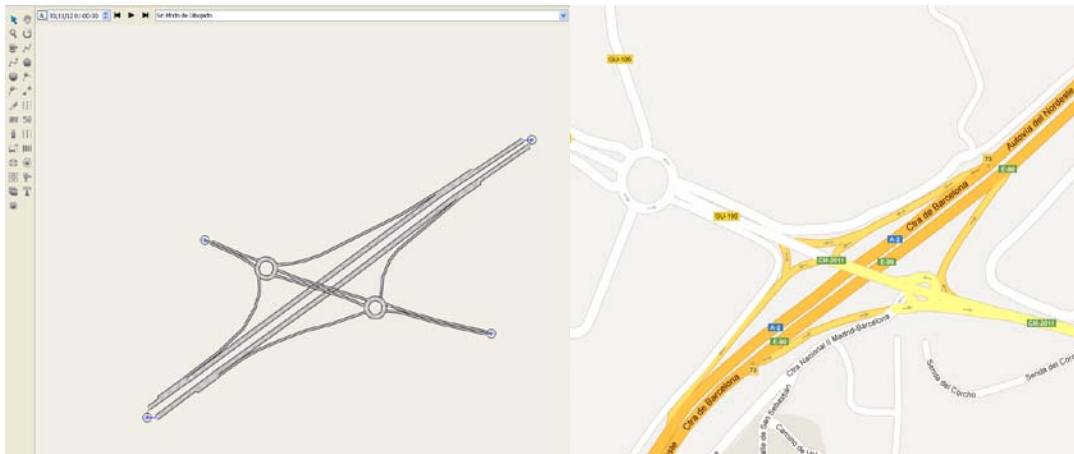
AÑO	IMD TOTAL	% ligeros	% pesados	IMD ligeros	IMD pesados
2011	17361	70%	30%	12152,7	5208,3
2010	17380	67%	33%	11644,6	5735,4
2009	17040	64%	36%	10905,6	6134,4
2008	17507	60%	40%	10504,2	7002,8
2007	17192	59%	41%	10143,28	7048,72
2006	17162	48%	52%	8237,76	8924,24
2005	16561	53%	47%	8777,33	7783,67

Tabla 26: Evolución IMD tramo de simulación [Datos DGT]

## 5.2 Modelado del tráfico

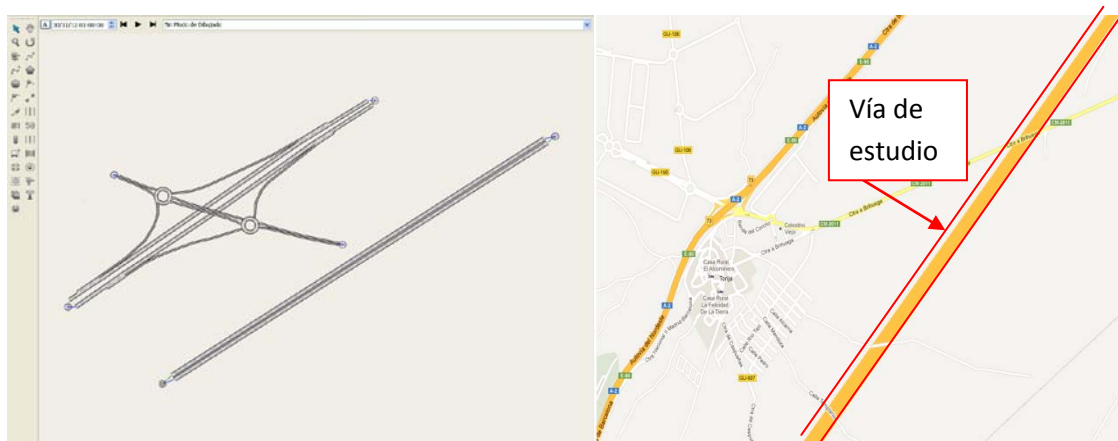
El primer paso consiste en definir la geometría de la vía por la que van a circular los vehículos. Para ello el programa dispone de herramientas elementales con las que se pueden definir los tramos de la vía. Ofrece la posibilidad de importar una imagen para poder dibujar la vía del modelo sobre la misma. Para estudiar los beneficios de separar el tráfico de vehículos pesados del ligero, se tienen dos escenarios:

- Escenario 0: Es la vía actual, en donde el tráfico es mixto. La geometría dibujada es la siguiente:



*Figura 59: Definición de la geometría del modelo Escenario 0*

- Escenario 1: En este escenario se tiene en cuenta la separación del tráfico. Habrá dos vías bien diferenciadas: La correspondiente a la del *Escenario 0*, por la que circularán únicamente vehículos ligeros. Y la vía por la cual circularán los vehículos pesados.







*Figura 60: Definición de la geometría del modelo Escenario 1*

### 5.2.1 Datos de demanda de tráfico

Los datos de demanda pueden ser definidos de dos formas distintas con AIMSUN:

- Introduciendo flujos de tráfico en cada sección
- Utilizando matrices O/D

En el caso de este proyecto se han utilizado matrices O/D, pues permite diferenciar los diferentes tipos de vehículos que compondrán la demanda. Para ello es necesario introducir en el modelo los siguientes datos de entrada:

- Definición de centroides: Fuentes y salidas de tráfico.
- Tipos de vehículos y atributos
- Clases de vehículos, en el caso de que existan caminos reservados
- Número de viajes desde cualquier centroide de origen hacia cualquier otro de destino.

Mediante diferentes matrices se podrá definir las condiciones de tráfico, cada una de las cuales dará el número de viajes desde cada centroide de origen hasta cada centroide de destino. Los vehículos serán creados en cada centroide de origen y se introducirán en el modelo a través de las secciones definidas.

**1) Definición de centroide de entrada Nacional II.** Un centroide en AIMSUN es un nodo de entrada/salida que permite entrar o salir a los vehículos del modelo de acuerdo a la demanda especificada. En este modelo se han definido cuatro nodos. Los de entrada/salida al modelo en la Nacional II. Dos de entrada/salida en la carretera CM-2011. En la siguientes figuras se muestran las entradas/salidas en el modelo:

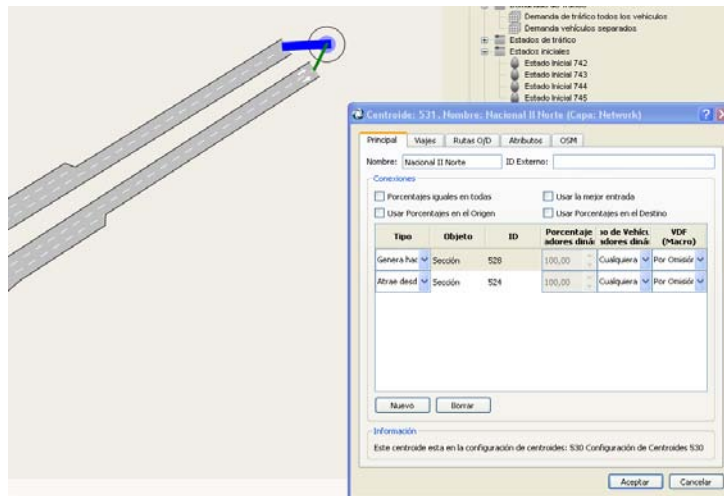


Figura 61: Centroide entrada/salida modelo de la Nacional II Norte

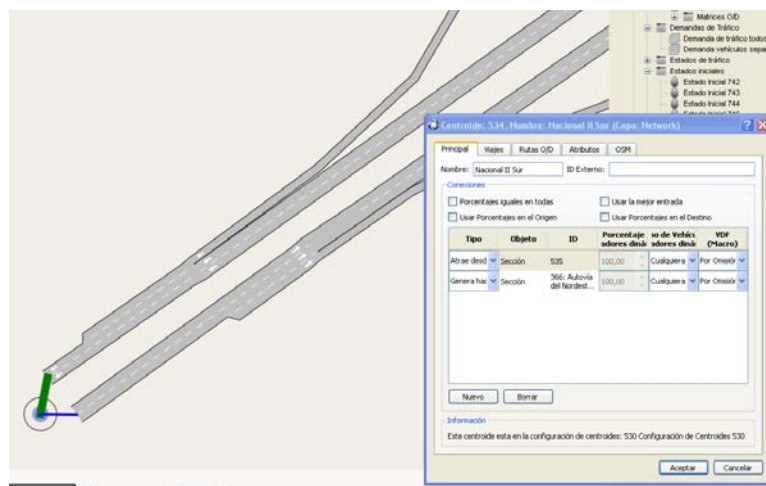


Figura 62: Centroide entada/salida del modelo de la Nacional II

Definición entrada/ salida centroide carretera CM 2011

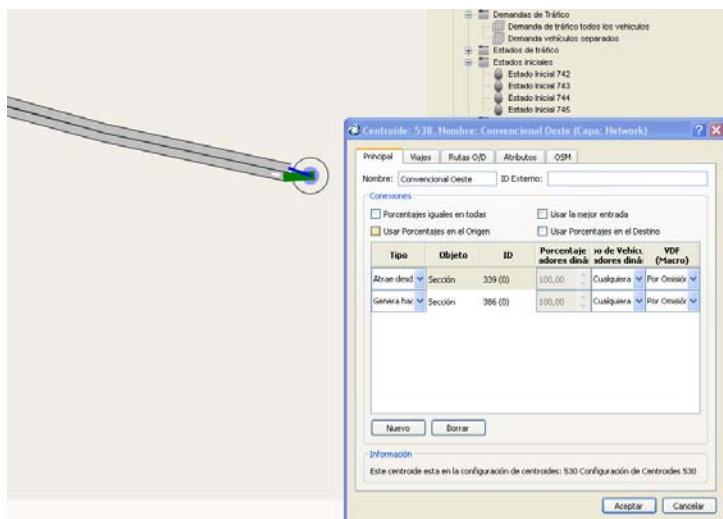


Figura 63: Centroide entrada/salida al modelo carretera CM-2011 Este

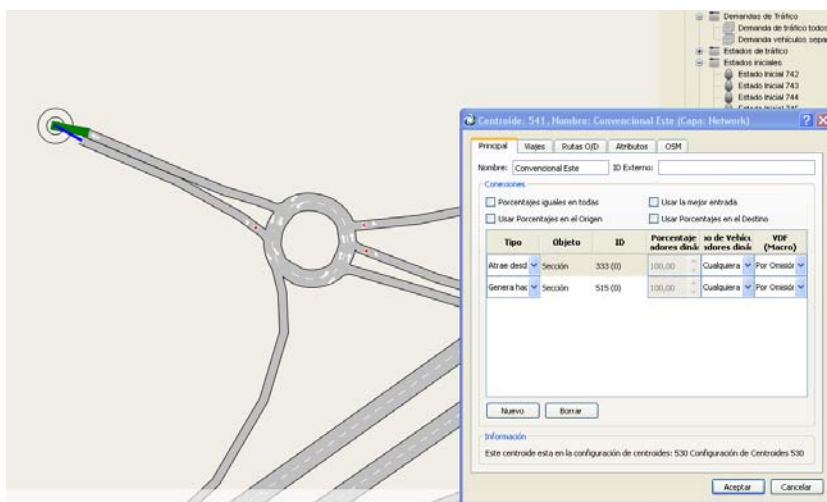
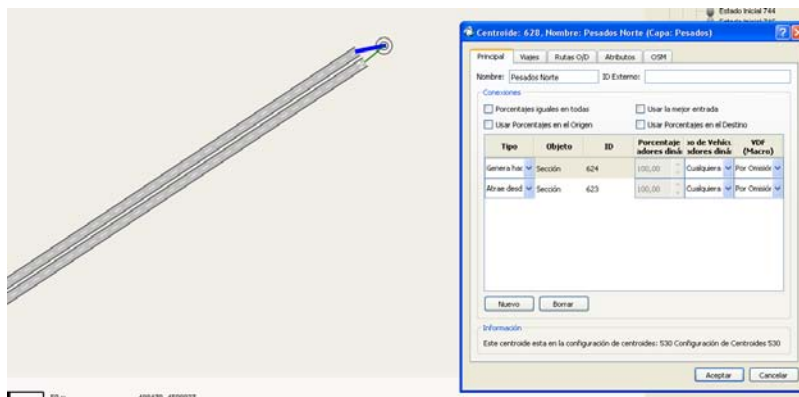
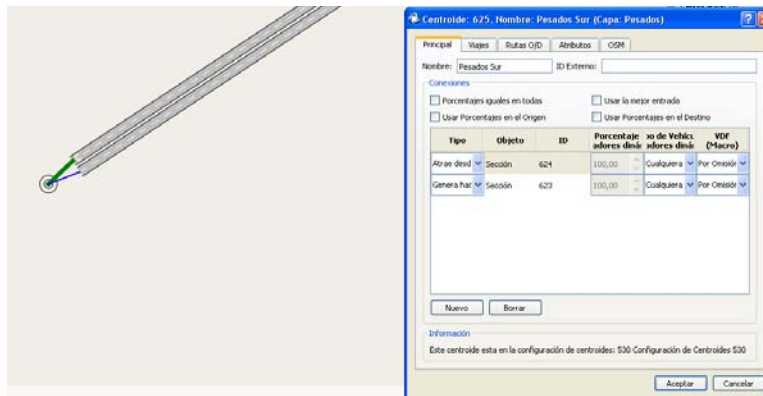


Figura 64: Centroide entrada/salida al modelo carretera CM-2011 Oeste

Las dos siguientes figuras corresponden a las entradas/salidas de los vehículos pesados en el Escenario 1:



*Figura 65: Centroide entrada/salida al modelo carretera vehículos pesados Norte*



*Figura 66: Centroide entrada/salida al modelo carretera vehículos pesados Sur*



## 2) Definición de parámetros de los vehículos

Los parámetros principales que el AIMSUN permite modificar, entre otros, son:

- Longitud del vehículo (m). Este parámetro se usa tanto para representar el vehículo como para modelar el comportamiento del mismo en la simulación. Tiene una influencia directa en la modelación del tráfico, ya que AIMSUN tiene en cuenta la longitud para asignar un modelo de comportamiento.
- Anchura del vehículo (m). AIMSUN sólo lo utiliza para representar gráficamente el vehículo, no tiene influencia en el modelo de tráfico.
- Velocidad máxima deseada (km/h). Esta es la velocidad máxima a la que circulará el vehículo en cualquier punto de la red
- Aceleración máxima ( $\text{m/s}^2$ ). Es la aceleración máxima que podrá alcanzar el vehículo bajo cualquier circunstancia. Esta aceleración es la usada en el modelo microscópico de seguimiento de vehículos de Gipps.
- Desaceleración máxima ( $\text{m/s}^2$ ). Es la desaceleración máxima que podrá experimentar el vehículo bajo circunstancias normales. Al igual que la aceleración, es la utilizada en el modelo de Gipps.
- Distancia mínima entre vehículos (m). Es la distancia mínima que dejará el vehículo entre él y el que le precede cuando están parados.
- Permanencia en el carril de adelantamiento. Define el porcentaje de vehículos que permanecen en el carril rápido durante una maniobra de adelantamiento.
- Adelantamiento por el carril lento. Define el porcentaje de vehículos que realizarán una maniobra de adelantamiento utilizando el carril lento.
- Cambio de carriles imprudentes. Define el porcentaje de vehículos que realizan un cambio de carril sin mantener una distancia de seguridad.
- Tolerancia de cruce: Los vehículos con aceleraciones inferiores a este valor se considerarán que están circulando a velocidad constante cuando se utiliza el modelo de emisión de contaminantes que se explicará en los próximos apartados.

A cada tipo de vehículo se le asignarán los valores de los parámetros antes mencionados.

En la siguiente figura se muestran los parámetros utilizados para los vehículos ligeros:

Tipo de Vehículo: 53. Nombre: Car

Principal Clases Características Formas 2D Formas 3D Parámetros por defecto del Experimento Combustible Emisión (QUAI)

Nombre: Car ID Externo:

	Media	Desviación	Mín	Máx
Longitud	4 m	0,50 m	3,50 m	4,50 m
Anchura	2 m	0 m	2 m	2 m
<b>Velocidad Máxima Deseada</b>	110 km/h	10 km/h	80 km/h	150 km/h
Aceleración Máxima	3 m/s <sup>2</sup>	0,20 m/s <sup>2</sup>	2,60 m/s <sup>2</sup>	3,40 m/s <sup>2</sup>
Desaceleración Normal	4 m/s <sup>2</sup>	0,25 m/s <sup>2</sup>	3,50 m/s <sup>2</sup>	4,50 m/s <sup>2</sup>
Desaceleración Máxima	6 m/s <sup>2</sup>	0,50 m/s <sup>2</sup>	5 m/s <sup>2</sup>	7 m/s <sup>2</sup>
Aceptación de Velocidad	1,10	0,10	0,90	1,30
Distancia Mínima entre Vehículos	1 m	0,30 m	0,50 m	1,50 m
Tiempo Máximo de Ceda el Paso	10 Segundos	2,50 Segundos	5 Segundos	15 Segundos
Aceptación de Guiado	100 %	0 %	100 %	100 %
Factor de Sensibilidad	1	0	1	1
Intervalo mínimo de tiempo entre vehículos	0 Segundos	0 Segundos	0 Segundos	0 Segundos

Permanencia en el Carril de Adelantamiento: 5,00 % Vehículos equipados: 0,00 %

Adelantamiento por el Carril Lento: 2,00 % Tolerancia de cruce: 0,80 m/s<sup>2</sup>

Cambios de Carril Imprudentes: 11,00 % PCUs: 1,00

Sensibilidad a Cambios de Carril Imprudentes: 1,00 Capacidad Máxima: 4,00 Número total de personas

Figura 67: Características vehículos ligeros

La siguiente figura muestra los valores asociados a los camiones:

Principal Clases Características Formas 2D Formas 3D Parámetros por defecto del Experimento Combustible Emisión (QUAI)

Nombre: Truck ID Externo:

	Media	Desviación	Mín	Máx
Longitud	8 m	2 m	6 m	10 m
Anchura	2,25 m	0,20 m	2 m	2,80 m
Velocidad Máxima Deseada	85 km/h	10 km/h	70 km/h	100 km/h
Aceleración Máxima	1 m/s <sup>2</sup>	0,50 m/s <sup>2</sup>	0,60 m/s <sup>2</sup>	1,80 m/s <sup>2</sup>
Desaceleración Normal	3,50 m/s <sup>2</sup>	1 m/s <sup>2</sup>	2,50 m/s <sup>2</sup>	4,00 m/s <sup>2</sup>
Desaceleración Máxima	5 m/s <sup>2</sup>	0,50 m/s <sup>2</sup>	4 m/s <sup>2</sup>	6 m/s <sup>2</sup>
Aceptación de Velocidad	1,05	0,10	1	1,10
Distancia Mínima entre Vehículos	1,50 m	0,50 m	1 m	2,50 m
Tiempo Máximo de Ceda el Paso	35 Segundos	10 Segundos	20 Segundos	60 Segundos
Aceptación de Guiado	100 %	0 %	100 %	100 %
Factor de Sensibilidad	1	0	1	1
Intervalo mínimo de tiempo entre vehículos	0 Segundos	0 Segundos	0 Segundos	0 Segundos

Permanencia en el Carril de Adelantamiento: 0,00 % Vehículos equipados: 0,00 %

Adelantamiento por el Carril Lento: 0,00 % Tolerancia de cruce: 0,80 m/s<sup>2</sup>

Cambios de Carril Imprudentes: 5,00 % PCUs: 1,90

Sensibilidad a Cambios de Carril Imprudentes: 2,00 Capacidad Máxima: 2,00 Número total de personas

Figura 68: Características de los camiones

Cada uno de estos valores puede no ser fijo, por lo que AIMSUN los asocia a una distribución normal con media y desviación conocidas. De esta forma utiliza un valor mínimo y máximo para realizar la simulación.



## 5.3 Modelos ambientales

AIMSUN ofrece tres modelos ambientales, denominados “*Modelo de Consumo de Combustible*”, “*Modelo de Emisión de Contaminantes QUARTET*” y el “*Modelo de Emisión de Contaminantes Panis el al*”. Estos modelos hay que activarlos o desactivarlos antes de correr la simulación.

### 5.3.1 Modelo de Consumo de Combustible

Este modelo asume que cada vehículo puede encontrarse a ralenti, a velocidad constante, acelerando o desacelerando. El estado de cada vehículo queda determinado por lo que el modelo puede utilizar la fórmula apropiada para calcular el consumo de combustible para dicho estado.

AIMSUN asume que para situaciones en las que el vehículo se encuentra a ralenti o desacelerando, el ratio de consumo es constante. Para vehículos acelerando el consumo viene dado por:

$$F_a = (c_1 + c_2 av)$$

*Ecuación 49: Consumo de combustible en la aceleración*

Donde  $c_1$  y  $c_2$  son constantes y  $a$  y  $v$  son la aceleración y la velocidad del vehículo respectivamente.

Para vehículos que circulan a velocidad constante, el consumo se determina mediante la siguiente expresión, definida por Akcelic:

$$\frac{dF}{dt} = k_1 \left( 1 + \frac{v^3}{2v_m^3} \right) + k_2 v$$

*Ecuación 50: Consumo de combustible a velocidad constante*

Donde  $v_m$  es la velocidad a la cuál el consumo es mínimo. En circulación continua, está demostrado que esta velocidad está en torno a los 90 km/h.  $k_1$  y  $k_2$  son constantes y  $v$  es la velocidad a la que se mueve el vehículo.



Las siguientes expresiones permiten determinar los valores de las constantes antes mencionadas para los vehículos que circulan a una velocidad comprendida entre los 90km/h y los 120 km/h, conociendo el ratio de consumo de combustible ( $F_1$  y  $F_2$ ) cada 100 km para cada velocidad  $v_1$  y  $v_2$ . Estas fórmulas fueron desarrolladas por el Departamento de Transporte del Reino Unido en 1994.

$$k_1 = \frac{(F_1 - F_2)v_1v_2v_m^3}{180(2v_2v_m^3 - 2v_1v_m^3 + v_2v_1^3 - v_1v_2^3)}$$

$$k_2 = \frac{2F_2v_2v_m^3 - 2F_1v_1v_m^3 + F_2v_2v_1^3 - F_1v_1v_2^3}{360(2v_2v_m^3 - 2v_1v_m^3 + v_2v_1^3 - v_1v_2^3)}$$

*Ecuación 51: Cálculo de las constantes  $k_1$  y  $k_2$*

En resumen, para cada instante de tiempo de simulación, el consumo de combustible para cada vehículo, será calculado en cada instante y para cada estado mediante las siguientes fórmulas:

*Tabla 27: Cálculo del consumo de combustible para cada estado del vehículo*



### 5.3.1.1 Parámetros de entrada del modelo de consumo de combustible

Para cada tipo de vehículo, los siguientes parámetros, que especifican los ratios de consumo de combustible del vehículo, deben ser definidos antes de realizar la simulación para obtener los valores de consumo de combustible:

$F_i$ : Ratio de consumo de combustible para vehículos a ralentí en ml/s

$c_1$  y  $c_2$ : Constantes de la ecuación de consumo de combustible para vehículos que están acelerando,  $F_a$ , en ml/s

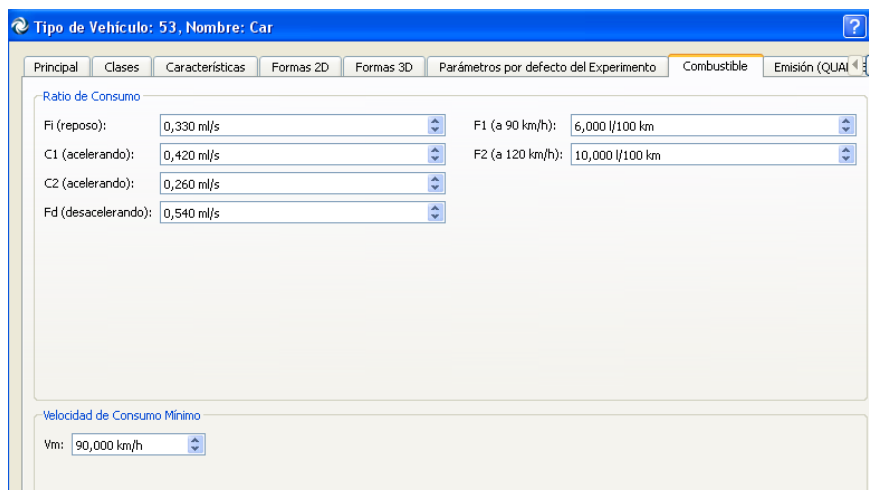
$F_1$ : Ratio de consumo para vehículos que viajan a una velocidad constante de 90 km/h. Se da en litros cada 100 km.

$F_2$ : Ratio de consumo para vehículos que viajan a una velocidad constante de 120 km/h. Se da en litros cada 100 km.

$v_m$ : Velocidad para la cual el vehículo consume la mínima cantidad de combustible, en km/h.

$F_d$ : Ratio de consumo para vehículos que están desacelerando en ml/s.

En el caso de los vehículos ligeros se introdujeron los siguientes valores de los parámetros de entrada del modelo de consumo de combustible:



Tipo de Vehículo: 53, Nombre: Car

Principal Clases Características Formas 2D Formas 3D Parámetros por defecto del Experimento **Combustible** Emisión (QUAI)

Ratio de Consumo

$F_i$  (reposo): 0,330 ml/s  $F_1$  (a 90 km/h): 6,000 l/100 km

$C_1$  (acelerando): 0,420 ml/s  $F_2$  (a 120 km/h): 10,000 l/100 km

$C_2$  (acelerando): 0,260 ml/s

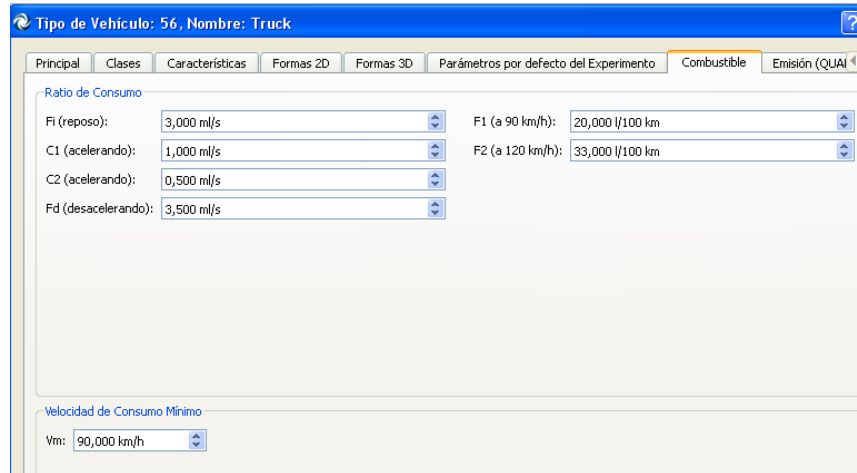
$F_d$  (desacelerando): 0,540 ml/s

Velocidad de Consumo Mínimo

$V_m$ : 90,000 km/h

Figura 69: Parámetros de entrada vehículos ligeros

Para los vehículos pesados, los valores fueron los siguientes:



*Figura 70: Parámetros de entrada vehículos pesados*

### 5.3.1.2 Parámetros de salida del modelo de consumo de combustible

Los datos de salida producidos por este modelo son los siguientes:

- Para la red, la distancia total recorrida (km) de todos los vehículos que han finalizado su viaje y el consumo de combustible total de todos ellos (litros).
- Para cada sección, la distancia total recorrida por todos los vehículos que atravesaron dicha sección y el consumo de combustible de todos ellos.
- Para cada ruta, la distancia total recorrida por todos los vehículos que recorrieron dicha ruta y el consumo total de combustible consumido por todos.

### 5.3.2 Modelo de Emisión de Contaminantes QUARTET

AIMSUN puede modelar las emisiones de todos los vehículos en la simulación. Para ello se deben crear las tablas correspondientes de cada contaminante que se desea estudiar. Las tablas proporcionan las tasas de emisión de contaminantes para todas las combinaciones relevantes de comportamientos, velocidades y aceleraciones. Pueden ser considerados un máximo de tres contaminantes. En el proyecto se tendrán en cuenta los tres más ampliamente utilizados:

- Monóxido de carbono CO
- Óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>
- Hidrocarburos HC

#### 5.3.2.1 Parámetros de entrada del modelo QUARTET

Para cada tipo de vehículo y cada contaminante, la información de entrada que necesita el modelo QUARTET es la siguiente:

- Nombre del contaminante
- Tasa de emisión en g/s para el estado de aceleración
- Tasa de emisión en g/s para el estado de ralentí
- Tasa de emisión en g/s para el estado de desaceleración
- Realizar una tabla para vehículos que circulan a velocidad constante, que consiste en definir pares de velocidades y consumo, para un máximo de quince.

Los valores de emisión para los vehículos ligeros se han obtenido de QUARTET 1992. Se resumen en la siguiente tabla:

Emission rates for cars (g/s)	CO	NO <sub>x</sub>	HC
Idling emission rate (g/s)	0.060	0.0008	0.0067
Accelerating emission rate (g/s)	0.377	0.0100	0.0200
Decelerating emission rate (g/s)	0.072	0.0005	0.0067
Cruising emission rate (g/s)			
10 km/h	0.060	0.0006	0.0063
20 km/h	0.091	0.0006	0.0078
30 km/h	0.130	0.0017	0.0083
40 km/h	0.129	0.0022	0.0128
50 km/h	0.090	0.0042	0.0097
60 km/h	0.110	0.0050	0.0117

70 km/h	0.177	0.0058	0.0136
---------	-------	--------	--------

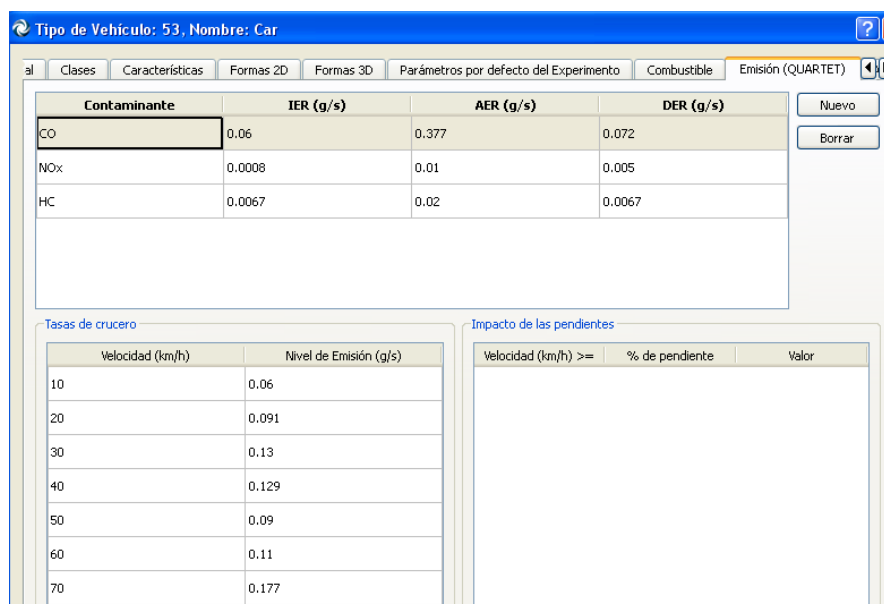
Tabla 28: Tasa de emisión de contaminantes vehículos ligeros [QUARTET]

Para los vehículos pesados se han cogido los siguientes valores:

Emission rates for heavy vehicles (g/s)	CO	NOx	HC
Idling emission rate (g/s)	0.050	0.0050	0.0383
Accelerating emission rate (g/s)	0.377	0.0100	0.0200
Decelerating emission rate (g/s)	0.072	0.0005	0.0067
Cruising emission rate (g/s)			
10 km/h	0.097	0.018	0.078
20 km/h	0.056	0.020	0.044
30 km/h	0.050	0.023	0.042
40 km/h	0.069	0.036	0.056
50 km/h	0.056	0.067	0.078
60 km/h	0.042	0.083	0.067
70 km/h	0.000	0.133	0.067

Tabla 29: Tasa de emisión de contaminantes vehículos pesados [QUARTET]

A modo de ejemplo, en las siguientes imágenes se muestran los datos introducidos en el modelo:



Tipo de Vehículo: 53, Nombre: Car

al Clases Características Formas 2D Formas 3D Parámetros por defecto del Experimento Combustible Emisión (QUARTET)

Contaminante	IER (g/s)	AER (g/s)	DER (g/s)
CO	0.06	0.377	0.072
NOx	0.0008	0.01	0.005
HC	0.0067	0.02	0.0067

Nuevo  
Borrar

Tasas de cruce

Velocidad (km/h)	Nivel de Emisión (g/s)
10	0.06
20	0.091
30	0.13
40	0.129
50	0.09
60	0.11
70	0.177

Impacto de las pendientes

Velocidad (km/h) >=	% de pendiente	Valor
---------------------	----------------	-------

Figura 71: Emisión CO vehículos ligeros en el modelo

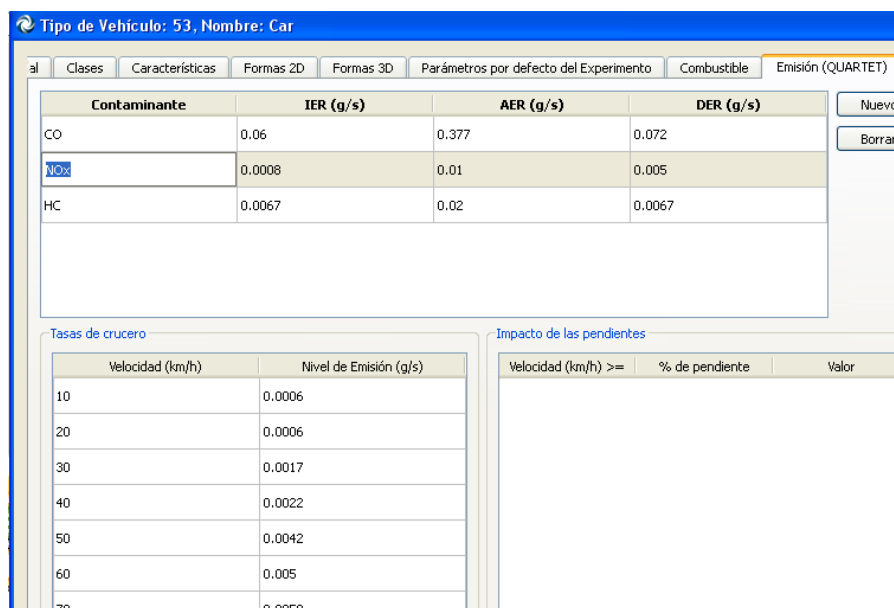


Figura 72: Emisión NOx vehículos ligeros en el modelo

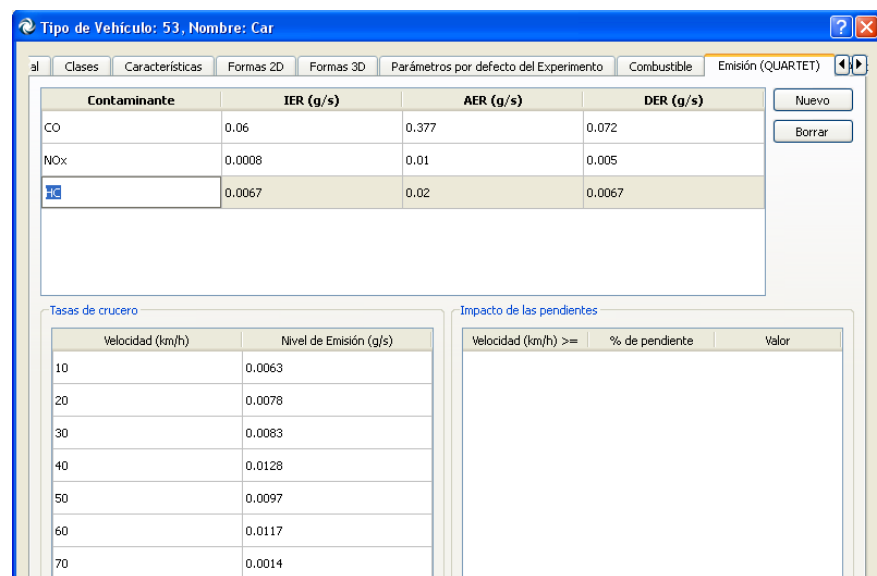


Figura 73: Emisión HC vehículos ligeros en el modelo

Para los vehículos pesados, se procedió a introducir los valores de la tasa de emisión de contaminantes teniendo en cuenta la *tabla 29*.



### **5.3.2.2 Parámetros de salida del modelo QUARTET**

Los datos de salida de este modelo son:

- Para la red, la distancia total recorrida por todos los vehículos que han finalizado el viaje y los kilogramos de cada contaminante emitidos por todos ellos.
- Para cada sección, los kilómetros totales recorridos por todos los vehículos que han atravesado la sección, y los kilogramos de contaminantes emitidos por todos los vehículos.
- Para cada ruta, la distancia total recorrida y los kilogramos de contaminante emitidos por todos los vehículos que siguieron dicha ruta.

## 5.4 Datos de la demanda

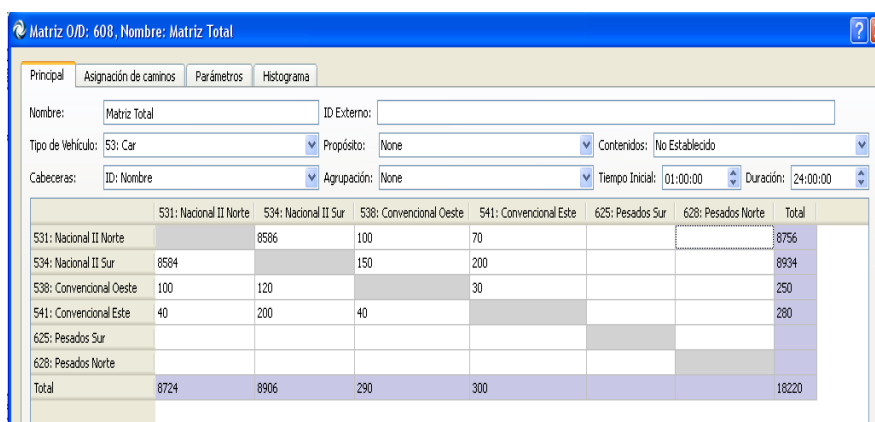
En este apartado se expone cómo se ha definido la demanda para los dos escenarios de estudio. Como ya se comentó anteriormente, se ha utilizado el método de las matrices O/D, ya que permiten definir la demanda para diferentes tipos de tráfico. En la simulación se quiere comparar cómo varían los parámetros de salida, de los modelos antes mencionados, para las mismas condiciones de demanda de tráfico. Así, es posible estudiar cómo varía la eficiencia del transporte de carreteras. A continuación se explica cómo ha sido definida la demanda en los diferentes escenarios.

Los datos de demanda del tramo de simulación han sido obtenidos mediante informes de la DGT. Aunque la tendencia de la variación de la demanda de los últimos cinco años es decreciente, tomaremos el valor medio para tener en cuenta el posible crecimiento de la demanda durante los próximos años, tal como se explicó en el Capítulo 2.

De esta forma, el valor considerado de la demanda es de 17171 vehículos diarios. Un 60% corresponde a tráfico de vehículos ligeros y el 40 % restante a vehículos pesados. Con estos datos se procedió a realizar la simulación de tráfico de los diferentes escenarios, para los cuales se definió la demanda como sigue:

### 5.4.1 Escenario 0

Para definir la demanda de tráfico por vehículo en AIMSUN, hay que definir primero la demanda total. Una vez definida, el programa permite dividirla según los porcentajes que se quieran obtener. De esta forma se puede dividir en un 60% de vehículos ligeros y en un 40% de vehículos pesados.

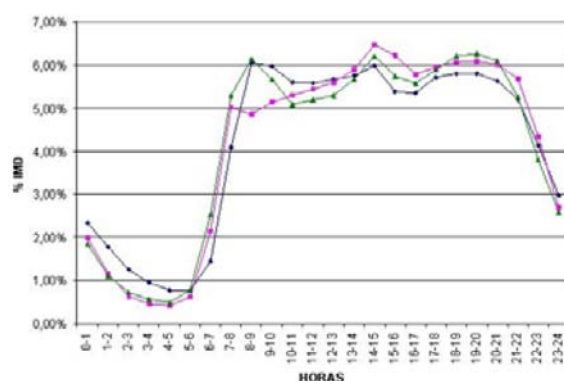


	531: Nacional II Norte	534: Nacional II Sur	538: Convencional Oeste	541: Convencional Este	625: Pesados Sur	628: Pesados Norte	Total
531: Nacional II Norte		8586	100	70			8756
534: Nacional II Sur	8584		150	200			8934
538: Convencional Oeste	100	120		30			250
541: Convencional Este	40	200	40				280
625: Pesados Sur							
628: Pesados Norte							
Total	8724	8906	290	300			18220

Figura 74: Definición de la demanda total del modelo

Además de definir la IMD de la ruta, se debe definir el intervalo horario de la simulación. En este proyecto, la simulación comienza a la 01:00, y su duración es de 24 horas.

Debido a que el intervalo de estudio es de 24 horas, hay que tener en cuenta la variación horaria. En los estudios de la DGT y del Ministerio de Fomento publicados únicamente se tiene en consideración la IMD total, por lo que los datos de variación horaria no están disponibles. Sin embargo, la variación horaria suele tener la siguiente forma en las vías de flujo continuo:



*Figura 75: Variación horaria tipo [UC3M]*

Teniendo esto en cuenta, se aproximó la variación horaria del tráfico según la siguiente:

Hora	% sobre el total de IMD
01:00-02:59	1,20
03:00-04:59	0,88
05:00-06:59	3,03
07:00-08:59	10,02
09:00-10:59	12,51
11:00-12:59	11,82
13:00-14:59	12,33
15:00-16:59	11,80
17:00-18:59	12,83
19:00-20:59	12,78
21:00-22:59	7,71
23:00-00:59	3,09

*Tabla 30: Variación horaria del tráfico en el modelo*



A continuación se pone como ejemplo la demanda de tráfico ligero y pesado del tramo de simulación:

Matriz O/D: 709, Nombre: Pesados Todos 15:00 a 16:59

Principal | Asignación de caminos | Parámetros | Histograma

Nombre: Pesados Todos 15:00 a 16:59 ID Externo:

Tipo de Vehículo: 56: Truck Propósito: None Contenidos: No Establecido

Cabeceras: ID: Nombre Agrupación: None Tiempo Inicial: 15:00:00 Duración: 2:00:00

	531: Nacional II Norte	534: Nacional II Sur	538: Convencional Oeste	541: Convencional Este	625: Pesados Sur	628: Pesados Norte	Total
531: Nacional II Norte		405,259	4,720	3,304			413,28
534: Nacional II Sur	405,165		7,080	9,440			421,68
538: Convencional Oeste	4,720	5,664		1,416			11,80
541: Convencional Este	1,888	9,440	1,888				13,22
625: Pesados Sur							
628: Pesados Norte							
Total	411,77	420,36	13,69	14,16			859,98

Figura 76: Ejemplo demanda de tráfico de vehículos pesados en el Escenario 0

Matriz O/D: 708, Nombre: Ligeros Todos 15:00 a 16:59

Principal | Asignación de caminos | Parámetros | Histograma

Nombre: Ligeros Todos 15:00 a 16:59 ID Externo:

Tipo de Vehículo: 53: Car Propósito: None Contenidos: No Establecido

Cabeceras: ID: Nombre Agrupación: None Tiempo Inicial: 15:00:00 Duración: 2:00:00

	531: Nacional II Norte	534: Nacional II Sur	538: Convencional Oeste	541: Convencional Este	625: Pesados Sur	628: Pesados Norte	Total
531: Nacional II Norte		607,889	7,080	4,956			619,92
534: Nacional II Sur	607,747		10,620	14,160			632,53
538: Convencional Oeste	7,080	8,496		2,124			17,70
541: Convencional Este	2,832	14,160	2,832				19,82
625: Pesados Sur							
628: Pesados Norte							
Total	617,66	630,54	20,53	21,24			1289,98

Figura 77: Ejemplo demanda de tráfico de vehículos ligeros en el Escenario 0

Para cada intervalo de dos horas, están definidas las mismas matrices en función de la *tabla 30*.

En las figuras anteriores están representados los flujos de tráfico para cada nodo. Los nodos 625: *Pesados Sur* y 628: *Pesados Norte*, corresponden a los nodos de la vía del *Escenario 1* por la que van a circular los vehículos pesados automatizados. Por esta razón en el *Escenario 0* las celdas están vacías.

## 5.4.2 Escenario 1

Para el *Escenario 1* se ha tenido en cuenta que los vehículos pesados ya no circulan con los vehículos ligeros. Por tanto para este escenario, las matrices de demanda de tráfico para cada intervalo horario han sido definidas de la siguiente forma:

La de los vehículos ligeros no varía respecto al *Escenario 0*:

Matriz O/D: 708, Nombre: Ligeros Todos 15:00 a 16:59

	531: Nacional II Norte	534: Nacional II Sur	538: Convencional Oeste	541: Convencional Este	625: Pesados Sur	628: Pesados Norte	Total
531: Nacional II Norte		607,889	7,080	4,956			619,92
534: Nacional II Sur	607,747		10,620	14,160			632,53
538: Convencional Oeste	7,080	8,496		2,124			17,70
541: Convencional Este	2,832	14,160	2,832				19,82
625: Pesados Sur							
628: Pesados Norte							
Total	617,66	630,54	20,53	21,24			1289,98

Figura 78: Ejemplo demanda de tráfico de vehículos ligeros en el Escenario 1

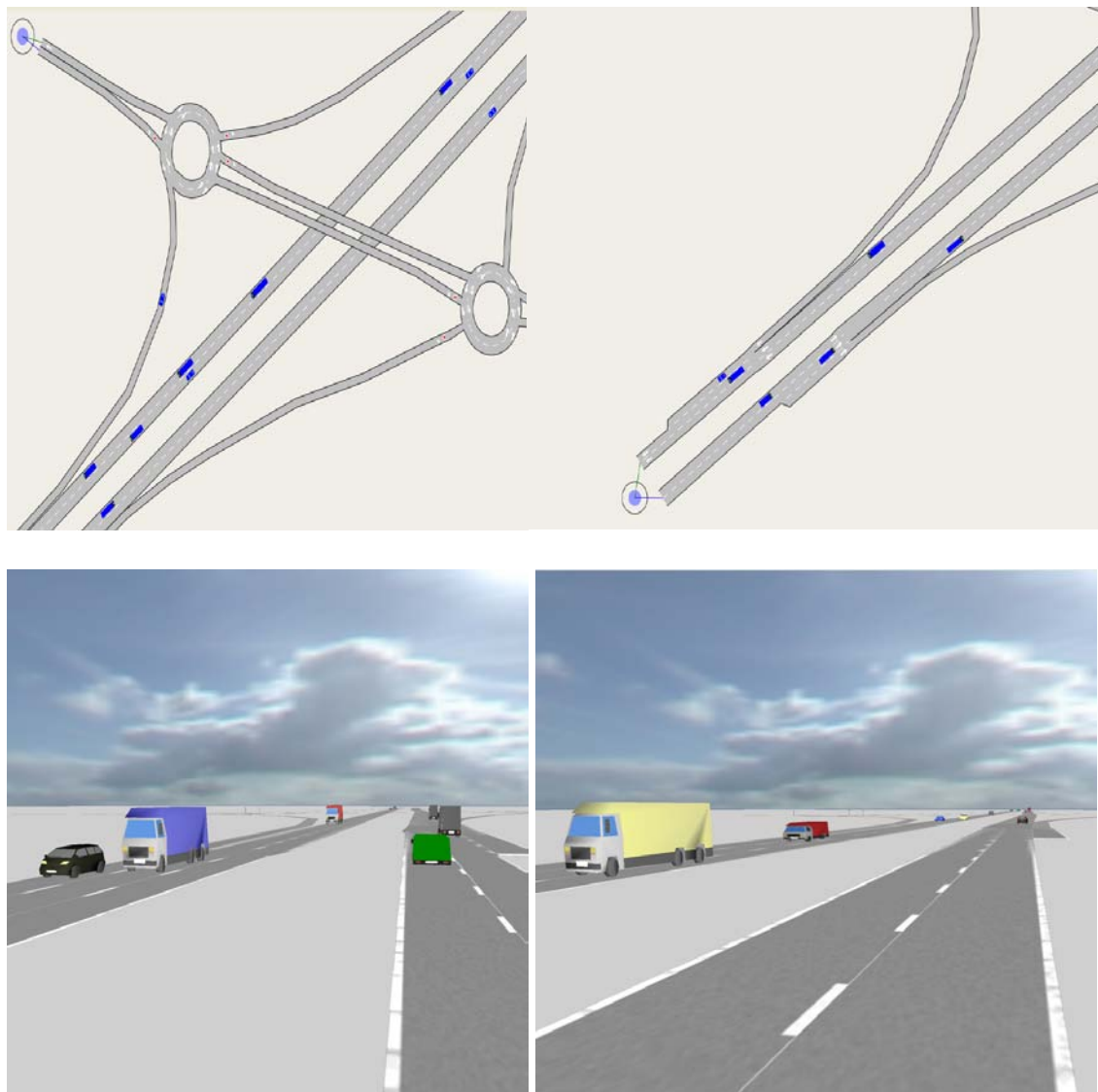
Matriz O/D: 727, Nombre: Pesados 15:00 a 16:59

	531: Nacional II Norte	534: Nacional II Sur	538: Convencional Oeste	541: Convencional Este	625: Pesados Sur	628: Pesados Norte	Total
531: Nacional II Norte							
534: Nacional II Sur							
538: Convencional Oeste							
541: Convencional Este							
625: Pesados Sur						435,880	435,88
628: Pesados Norte					424,100		424,10
Total					424,10	435,88	859,98

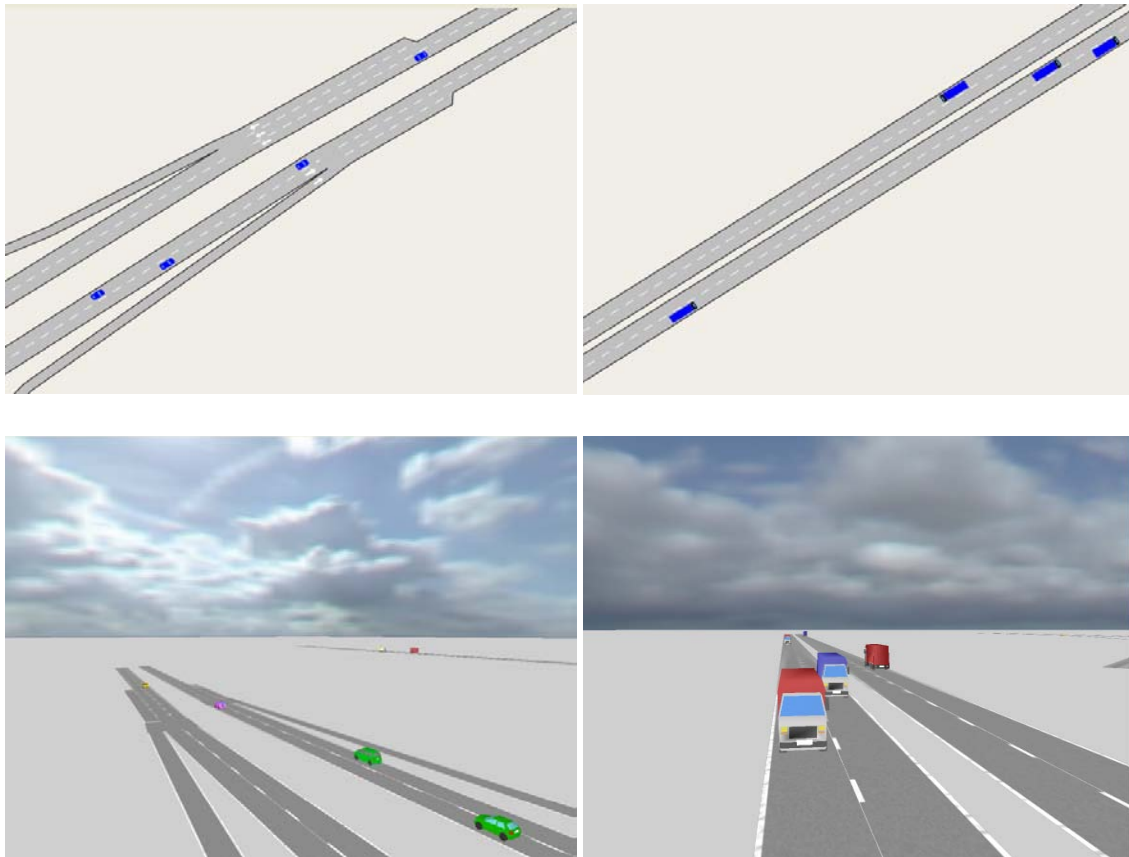
Figura 79: Ejemplo demanda de tráfico de vehículos pesados en el Escenario 1

## 5.5 Resultados de la simulación

Una vez cargados todos los datos de la red y de los vehículos se puede realizar la simulación del modelo. Las siguientes imágenes muestran algunas capturas de pantalla de la simulación:



*Figura 80: Simulación Escenario 0, “Situación actual”*



*Figura 81: Simulación Escenario 1, “Situación de estudio”*



### 5.5.1 Escenario 0

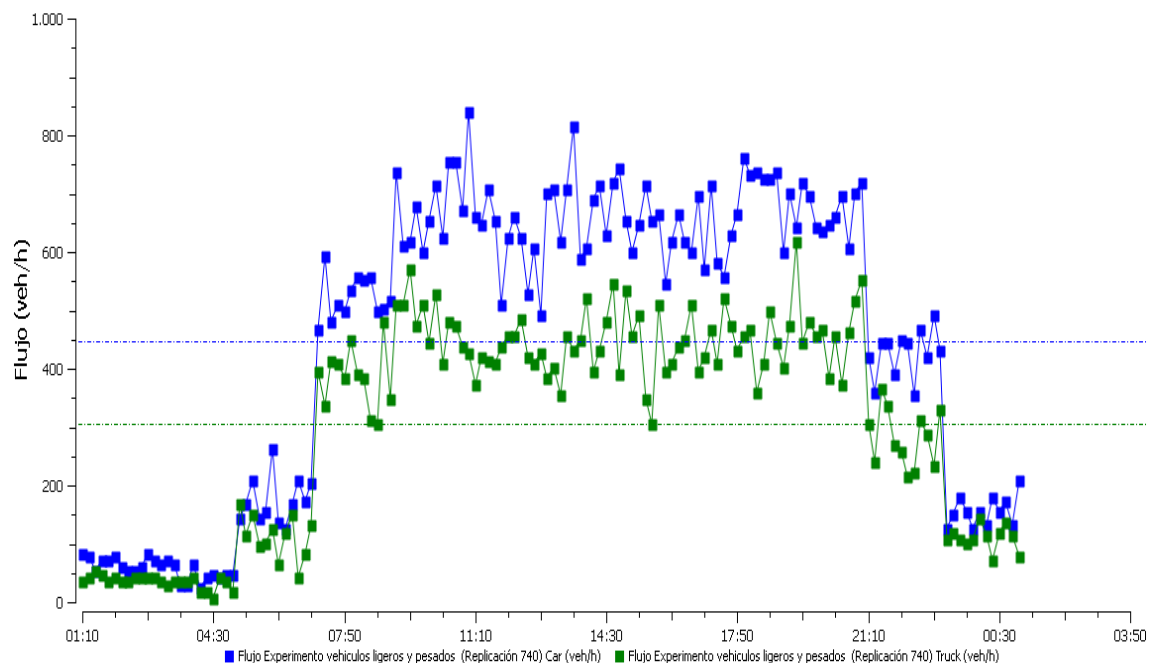
Una vez definidos todos los parámetros de entrada necesarios para realizar la simulación del Escenario 0, se obtuvieron los siguientes resultados de simulación:

Serie Temporal	Valor	Unidades
CO Contaminante Todos	59,44	kg
CO Contaminante Car	44,92	kg
CO Contaminante Truck	14,52	kg
NOx Contaminante Todos	37,97	kg
NOx Contaminante Car	26,51	kg
NOx Contaminante Truck	11,46	kg
HO Contaminante Todos	38,61	kg
HO Contaminante Car	27,01	kg
HO Contaminante Truck	11,6	kg
Consumo de Combustible Todos	1530,31	l
Consumo de Combustible Car	769,57	l
Consumo de Combustible Truck	760,74	l
Densidad Todos	0,75	veh/km
Densidad Car	0,41	veh/km
Densidad Truck	0,34	veh/km
Distancia total recorrida Todos	11621,64	km
Distancia total recorrida Car	6920,06	km
Distancia total recorrida Truck	4701,59	km
Tiempo de Demora Todos	1,97	seg/km
Tiempo de Demora Car	1,65	seg/km
Tiempo de Demora Truck	2,45	seg/km
Tiempo de Parada Todos	0,07	seg/km
Tiempo de Parada Car	0,06	seg/km
Tiempo de Parada Truck	0,1	seg/km
Tiempo de Viaje Todos	44,82	seg/km
Tiempo de Viaje Car	41,14	seg/km
Tiempo de Viaje Truck	50,24	seg/km
Tiempo total de viaje Todos	143,83	h
Tiempo total de viaje Car	78,61	h
Tiempo total de viaje Truck	65,22	h
Velocidad Todos	84,35	km/h
Velocidad Car	91,53	km/h
Velocidad Truck	73,82	km/h

*Tabla 31: Resumen resultados obtenidos en la simulación del Escenario 0*

En los siguientes apartados se mostrará, gráficamente, los valores obtenidos de las variables de estudio de la simulación. En el *Anexo I* se encontrarán las tablas mediante las cuales se obtuvieron dichas gráficas.

En la siguiente gráfica se representa el flujo de vehículos pesados y ligeros del modelo. Al ser las demandas del *Escenario 0* y *Escenario 1* iguales, el gráfico es válido para ambos. Se han considerado iguales porque se quiere comparar, con las mismas condiciones de tráfico, la variación de los valores de salida del modelo, es decir, consumo de carburantes, velocidad media, emisión de contaminantes, etc.



*Figura 82: Flujo de vehículos en el modelo de simulación*

### 5.5.1.1 Emisión de contaminante CO

En las siguientes gráficas, está representada la emisión de CO en función del intervalo horario de simulación:

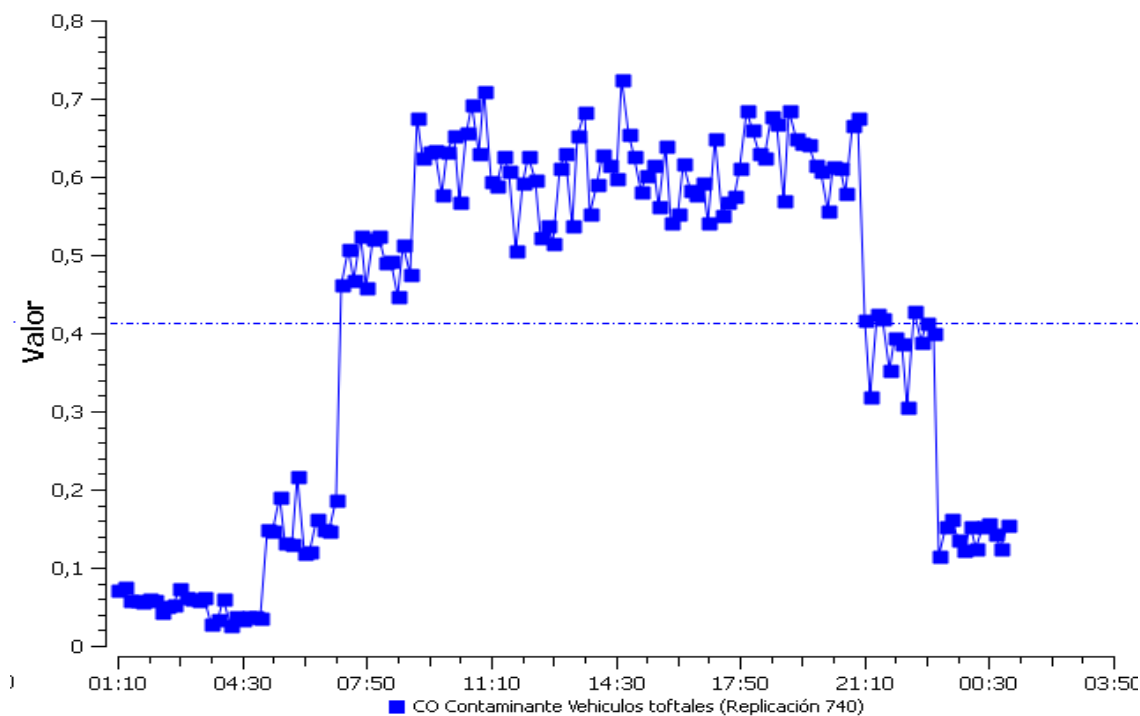


Figura 83: Emisión de CO en el Escenario 0 para todos los vehículos

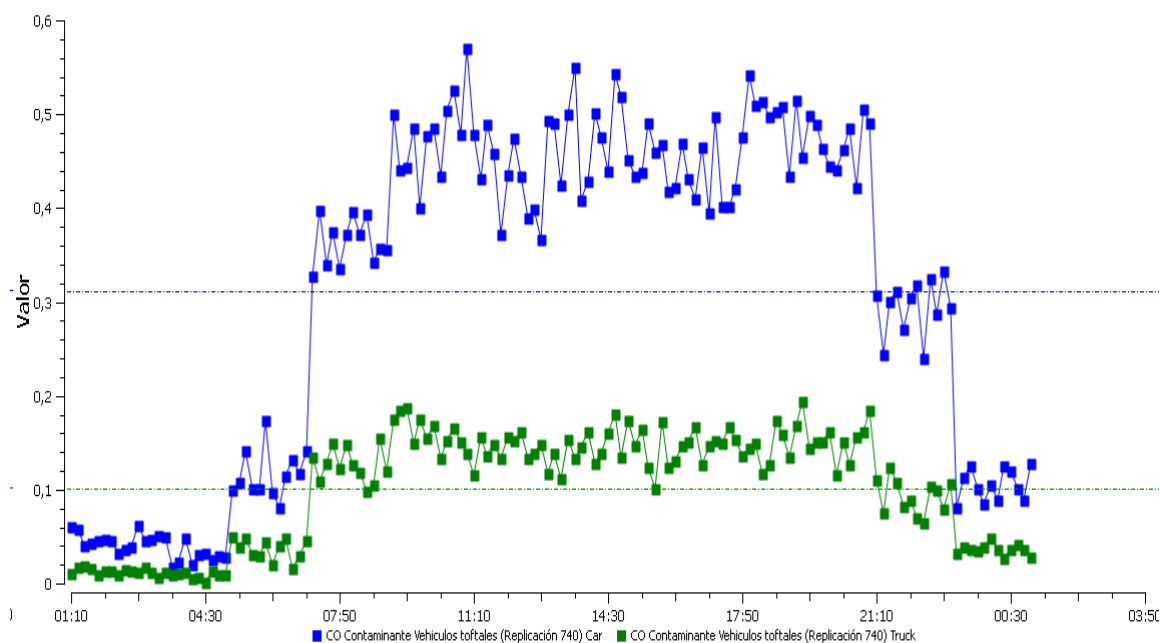


Figura 84: Emisión de CO en el Escenario 0 por vehículo



### 5.5.1.2 Emisión de contaminante HO

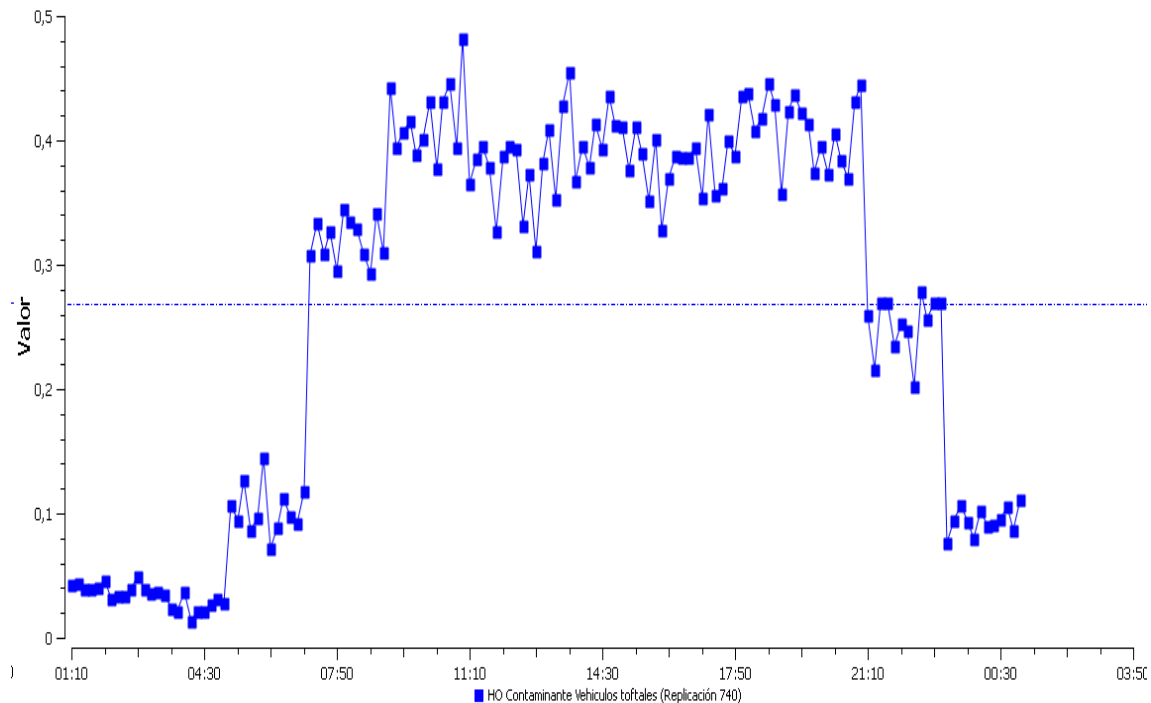


Figura 85: Emisión de HO en el Escenario 0 para todos los vehículos

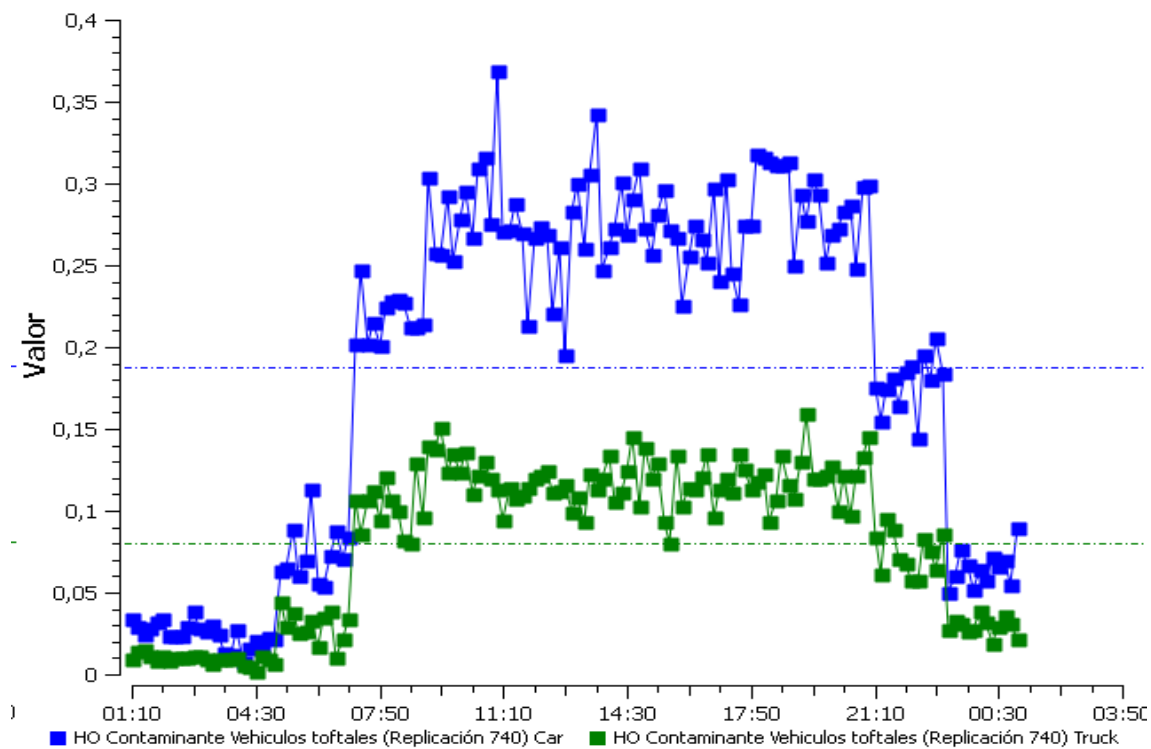


Figura 86: Emisión de HO en el Escenario 0 por vehículo



### 5.5.1.3 Emisión de contaminante NOx

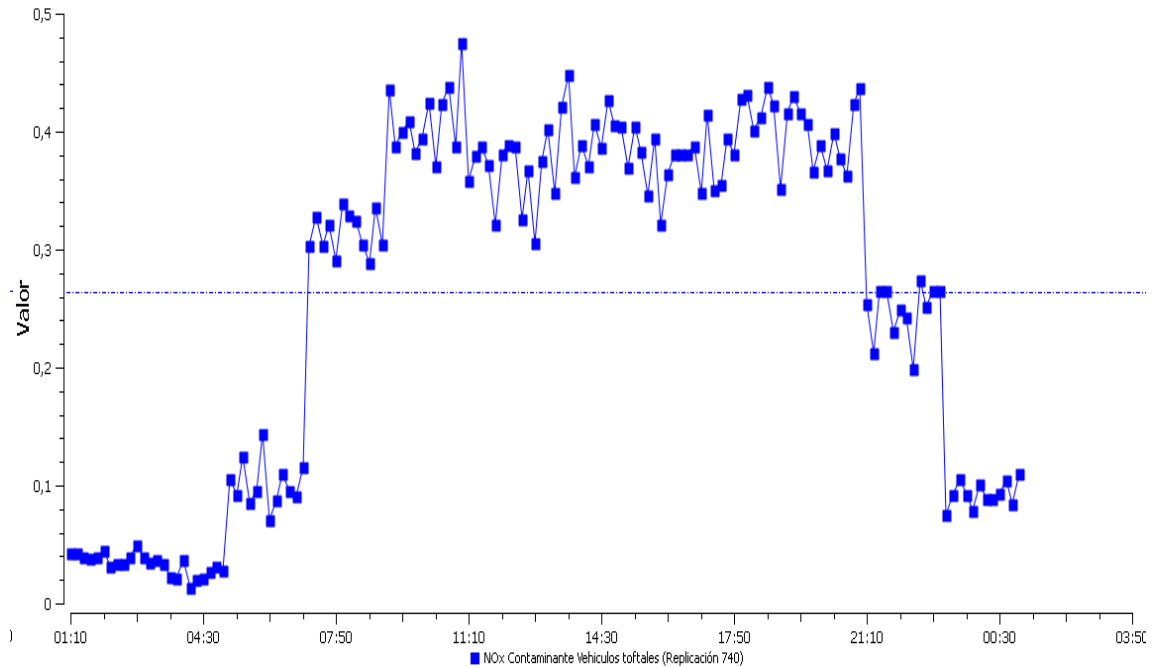


Figura 87: Emisión de NOx en el Escenario 0 para todos los vehículos

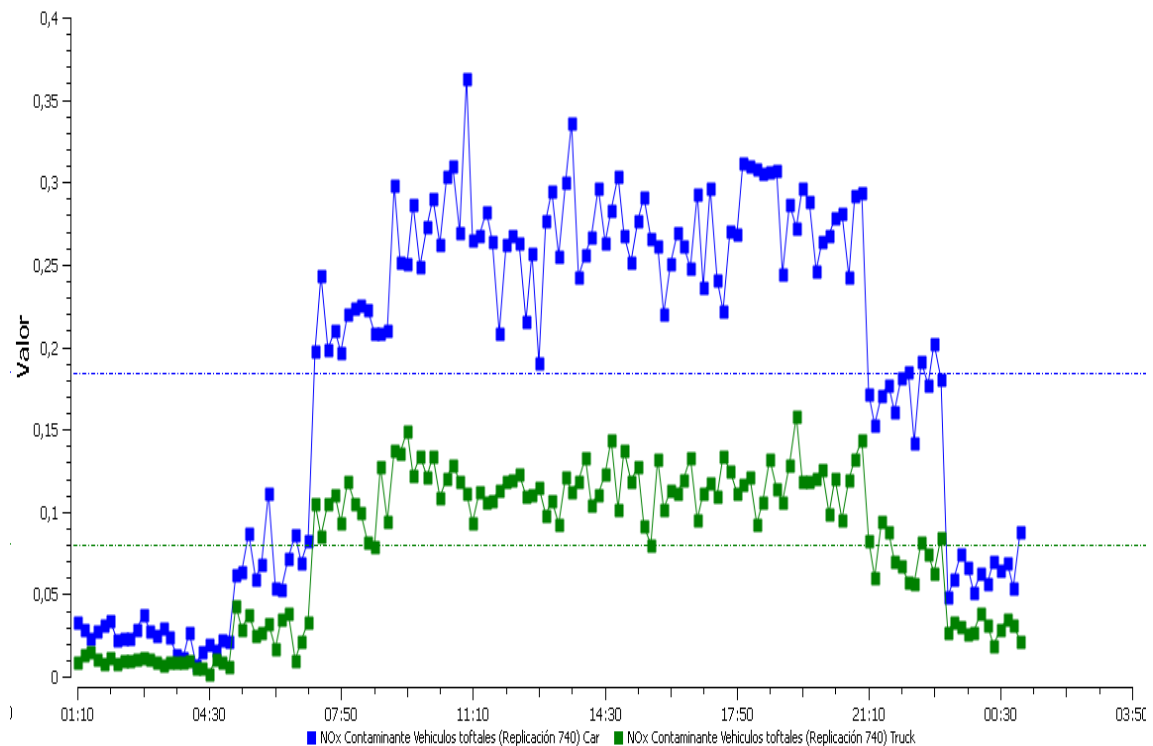


Figura 88: Emisión de NOx en el Escenario 0 por vehículo

### 5.5.1.4 Consumo de combustible

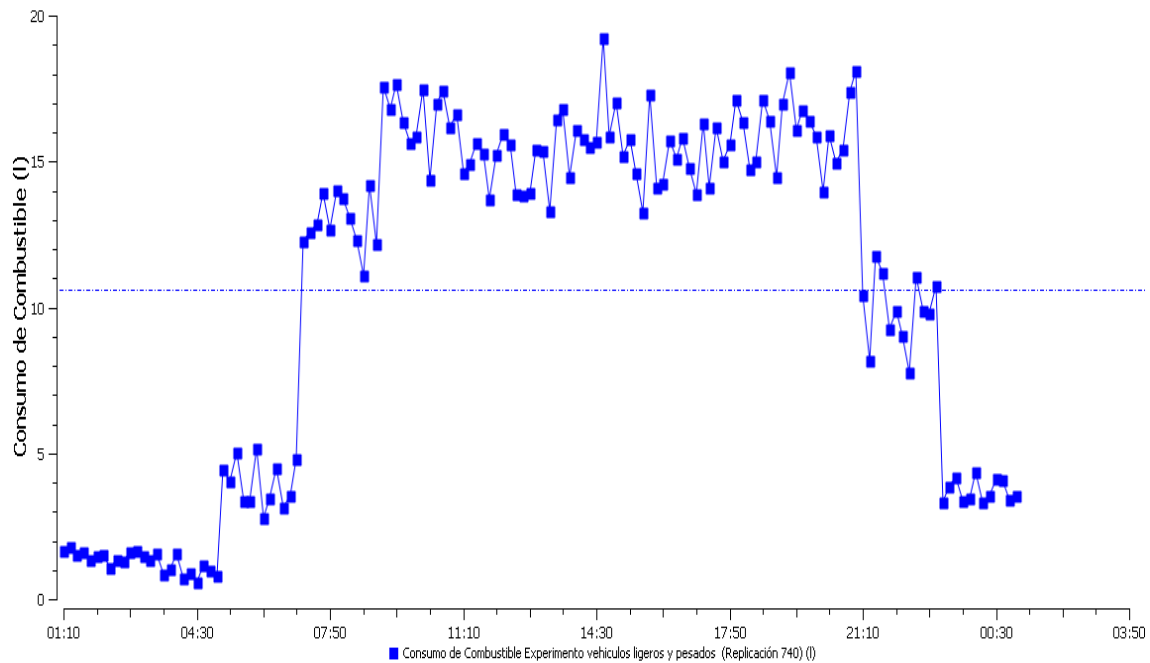


Figura 89: Combustible en el Escenario 0 para todos los vehículos

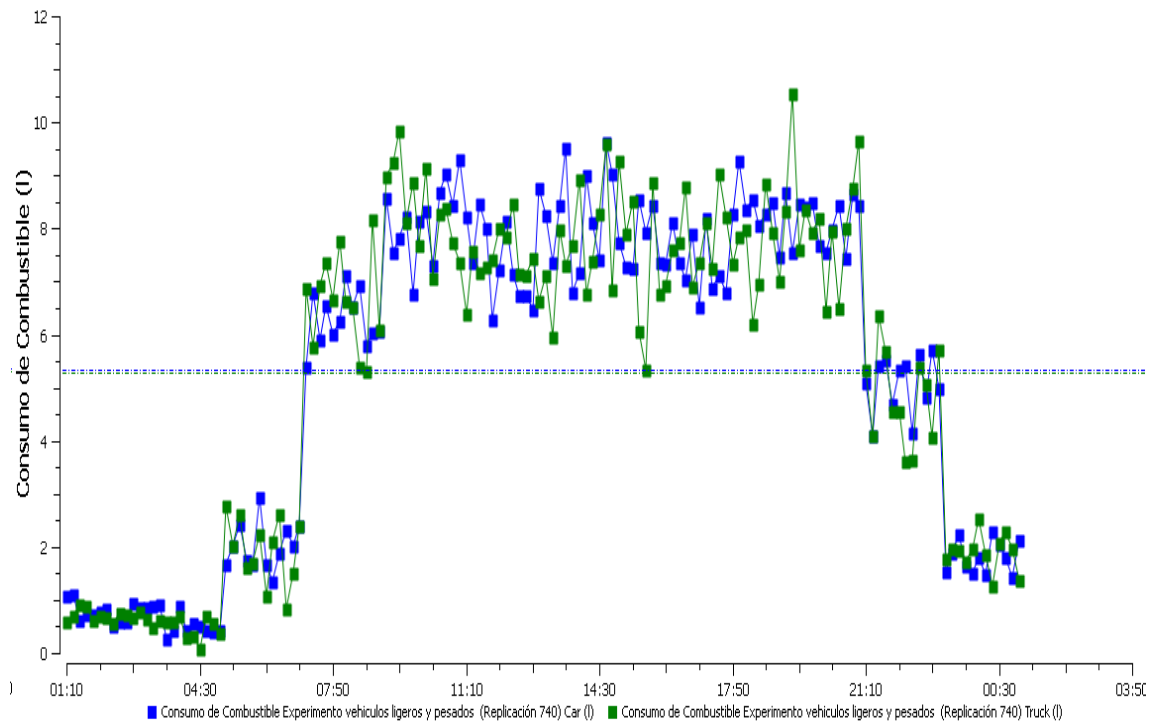


Figura 90: Combustible en el Escenario 0 por vehículo

### 5.5.1.5 Densidad

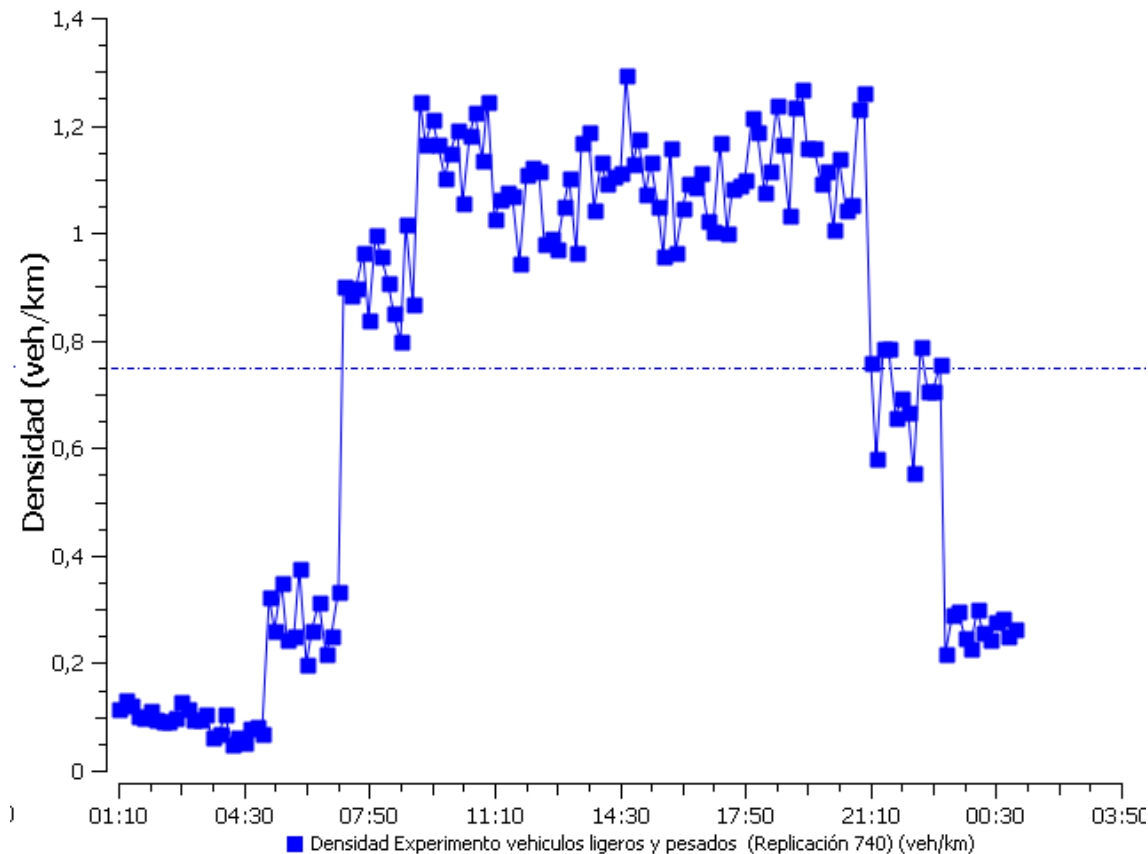


Figura 91: Densidad en el Escenario 0 para todos los vehículos

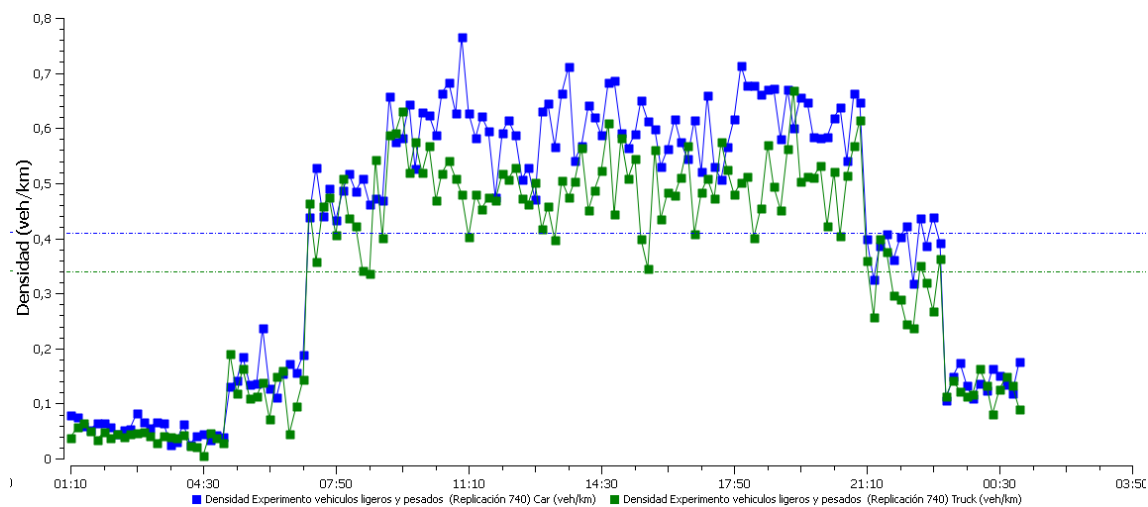


Figura 92: Densidad en el Escenario 0 por vehículo

### 5.5.1.6 Distancia total recorrida

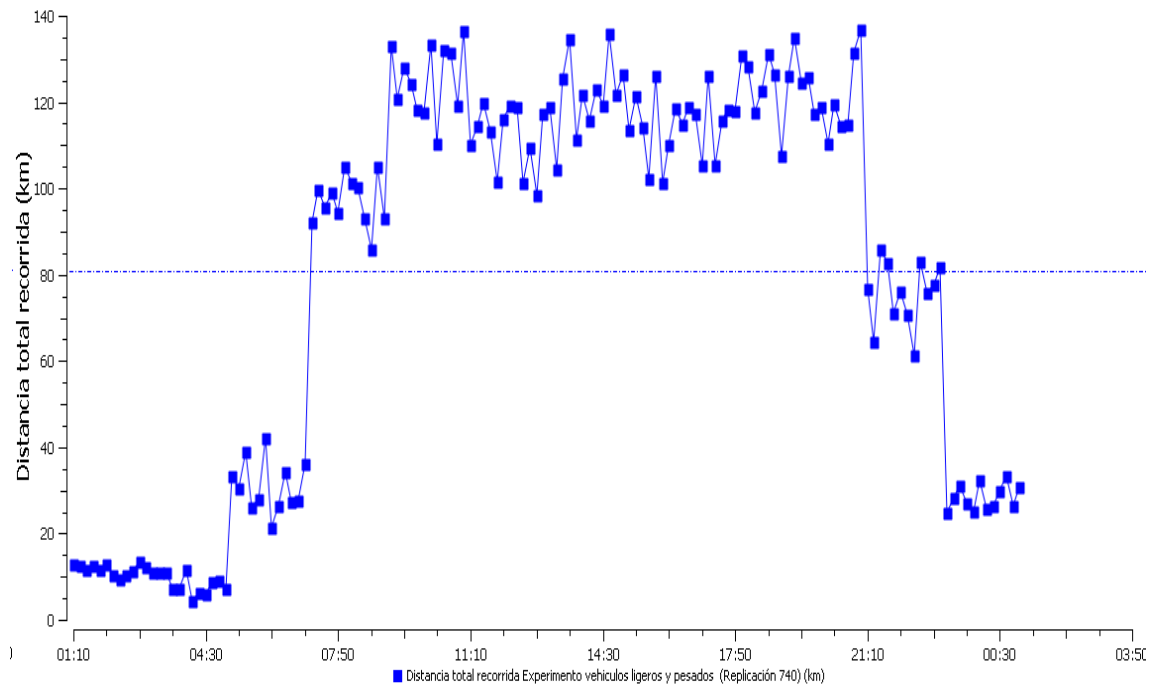


Figura 93: Distancia total en el Escenario 0 para todos los vehículos

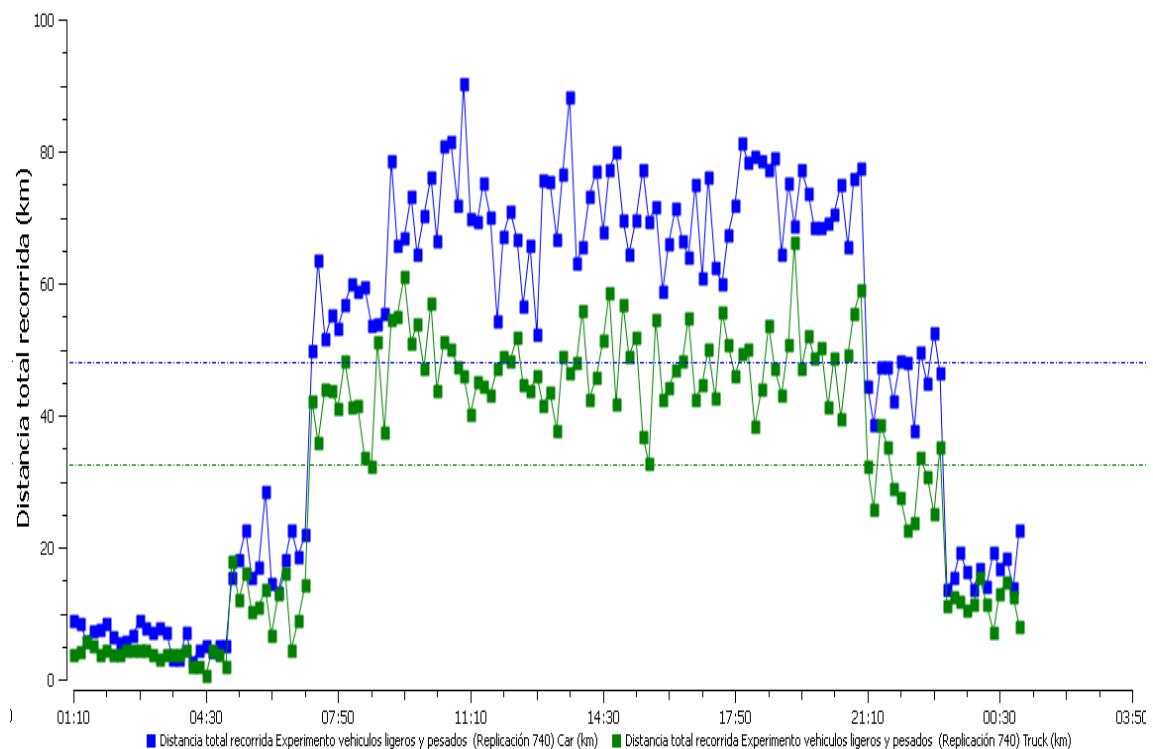


Figura 94: Distancia total en el Escenario 0 por vehículo

### 5.5.1.7 Tiempo de demora

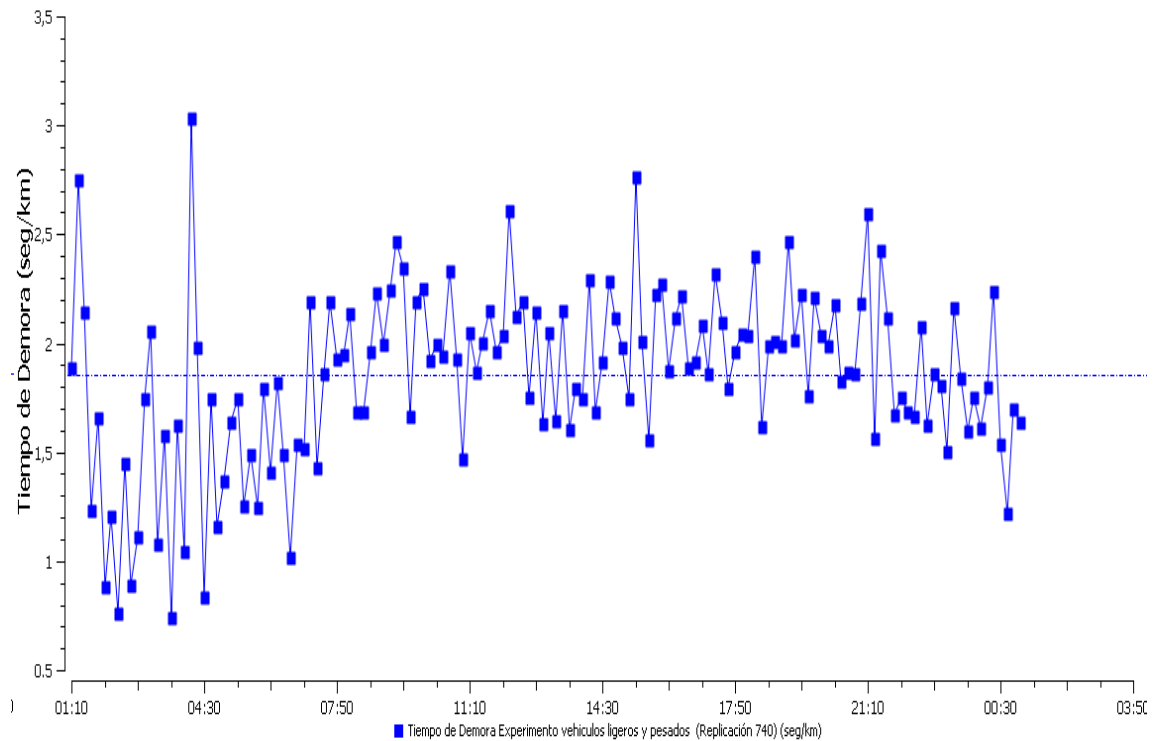


Figura 95: Tiempo de demora en el Escenario 0 para todos los vehículos

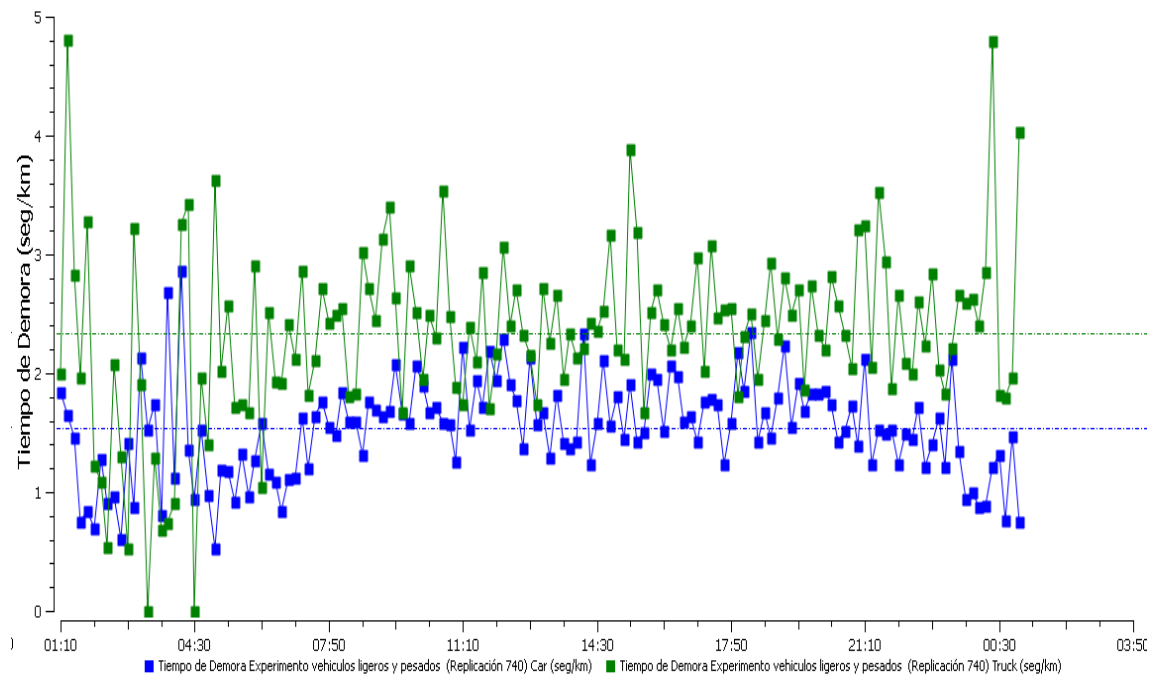


Figura 96: Tiempo de demora en el Escenario 0 por vehículo



### 5.5.1.8 Tiempo de viaje

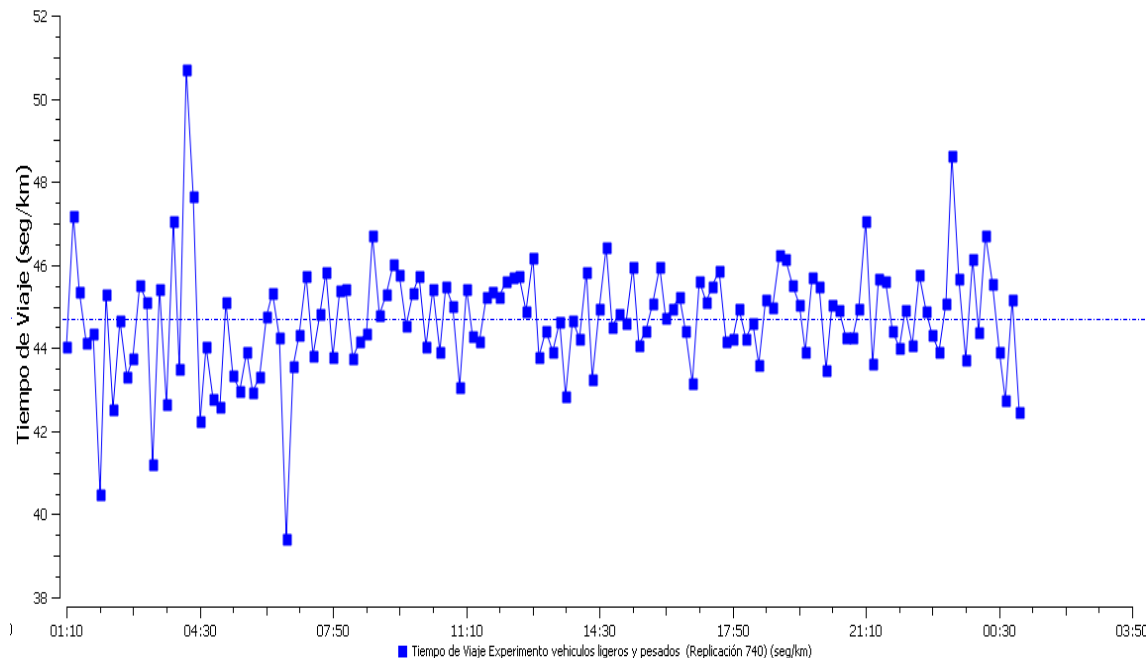


Figura 97: Tiempo de viaje en el Escenario 0 para todos los vehículos

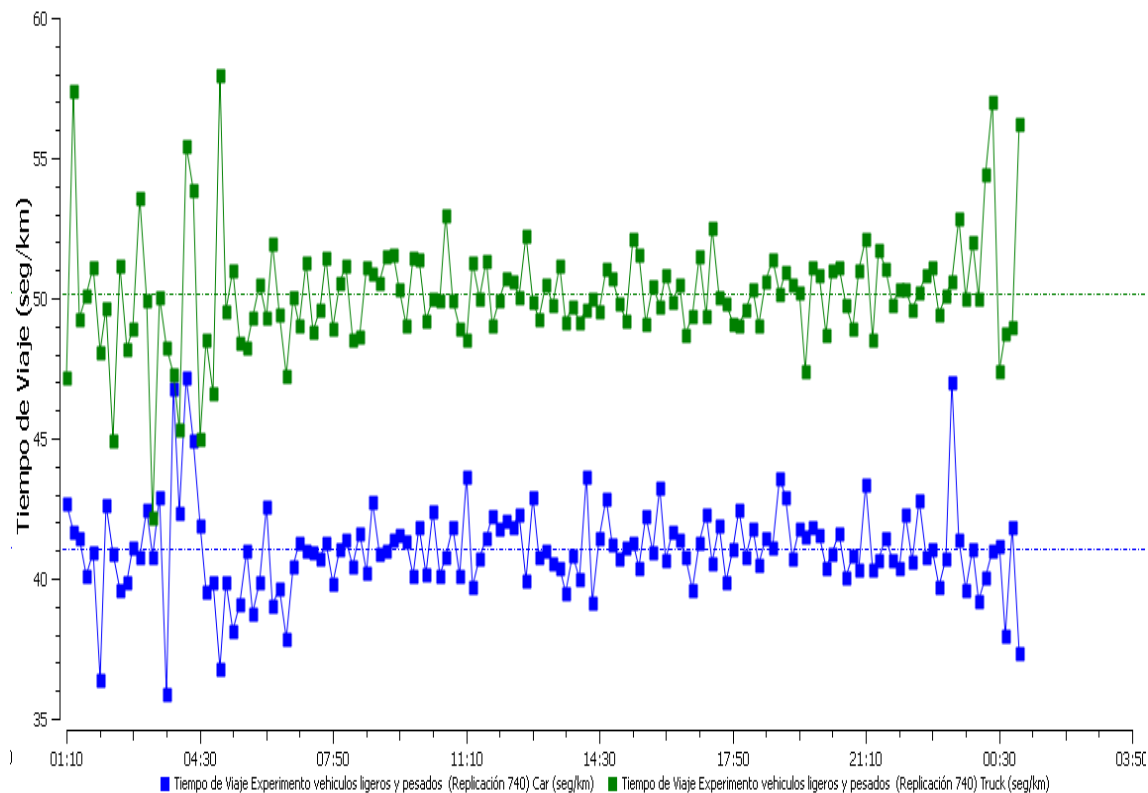


Figura 98: Tiempo de viaje en el Escenario 0 por vehículo

### 5.5.1.9 Velocidad

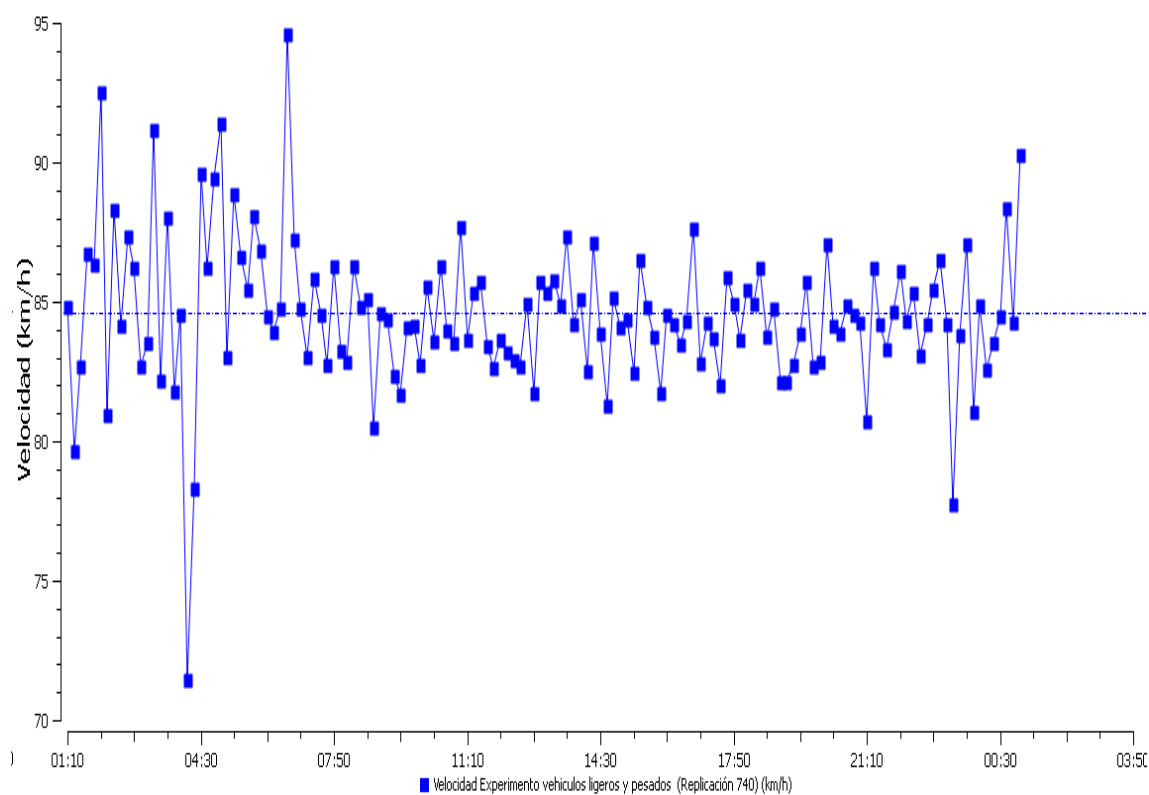


Figura 99: Tiempo de viaje en el Escenario 0 para todos los vehículos

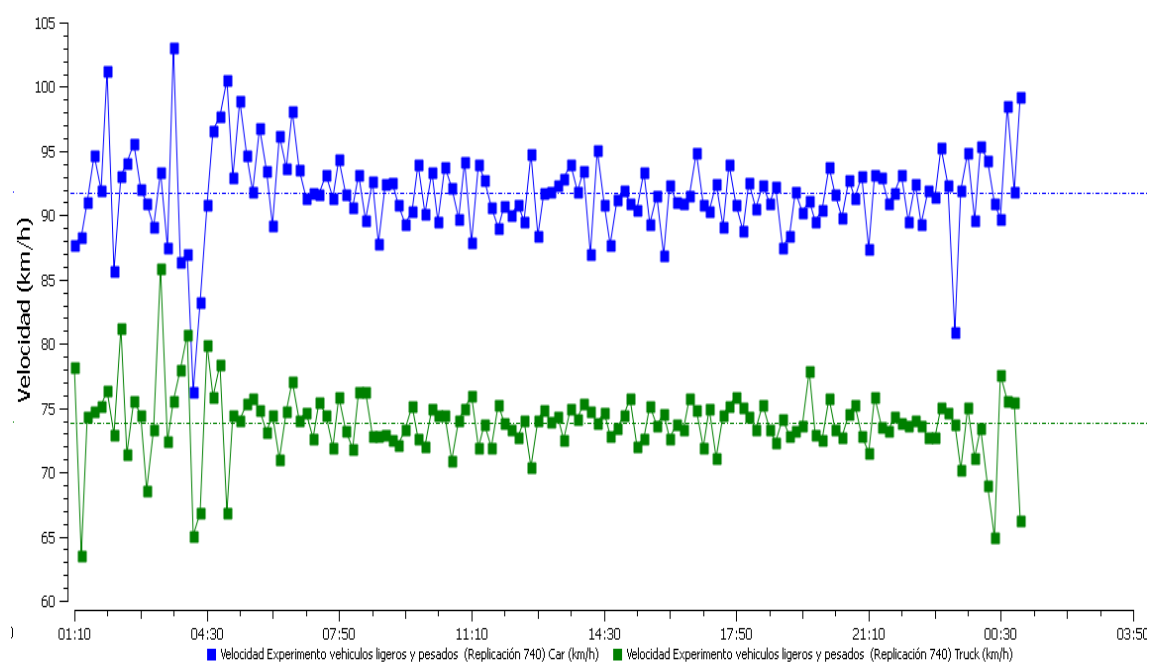


Figura 100: Tiempo de viaje en el Escenario 0 por vehículo



### 5.5.2 Escenario 1

Al igual que en el *Escenario 0*, en la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos con la simulación para el *Escenario 1*:

Serie Temporal	Valor	Unidades
CO Contaminante Todos	57,18	kg
CO Contaminante Car	44,27	kg
CO Contaminante Truck	12,91	kg
NOx Contaminante Todos	39,58	kg
NOx Contaminante Car	26,7	kg
NOx Contaminante Truck	12,88	kg
HO Contaminante Todos	40,06	kg
HO Contaminante Car	27,17	kg
HO Contaminante Truck	12,89	kg
Consumo de Combustible Todos	1601,44	l
Consumo de Combustible Car	767,91	l
Consumo de Combustible Truck	833,53	l
Densidad Todos	0,78	veh/km
Densidad Car	0,42	veh/km
Densidad Truck	0,36	veh/km
Distancia total recorrida Todos	12865,35	km
Distancia total recorrida Car	7046,45	km
Distancia total recorrida Truck	5818,9	km
Tiempo de Demora Todos	0,85	seg/km
Tiempo de Demora Car	1,32	seg/km
Tiempo de Demora Truck	0,14	seg/km
Tiempo de Parada Todos	0,03	seg/km
Tiempo de Parada Car	0,03	seg/km
Tiempo de Parada Truck	0,02	seg/km
Tiempo de Viaje Todos	41,75	seg/km
Tiempo de Viaje Car	40,99	seg/km
Tiempo de Viaje Truck	42,9	seg/km
Tiempo total de viaje Todos	149,02	h
Tiempo total de viaje Car	79,68	h
Tiempo total de viaje Truck	69,34	h
Velocidad Todos	88,98	km/h
Velocidad Car	91,89	km/h
Velocidad Truck	84,6	km/h

Tabla 32: Resumen resultados obtenidos en la simulación del Escenario 1



### 5.5.2.1 Emisión de contaminante CO

En las siguientes gráficas, está representada la emisión de CO en función del intervalo horario de simulación:

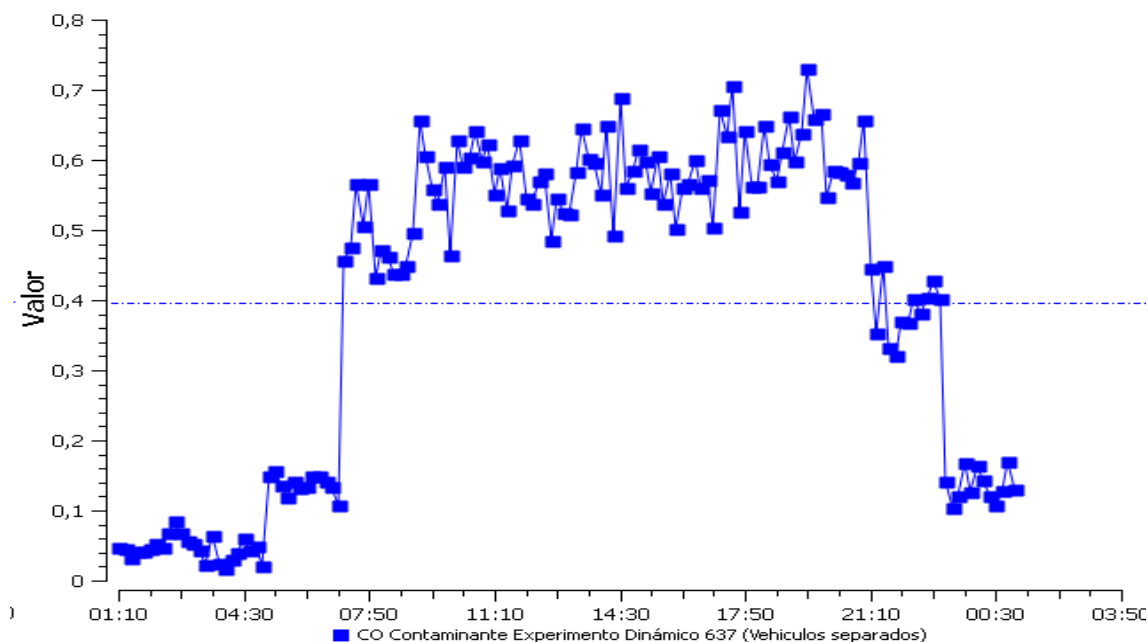


Figura 101: Emisión de CO en el Escenario 1 para todos los vehículos

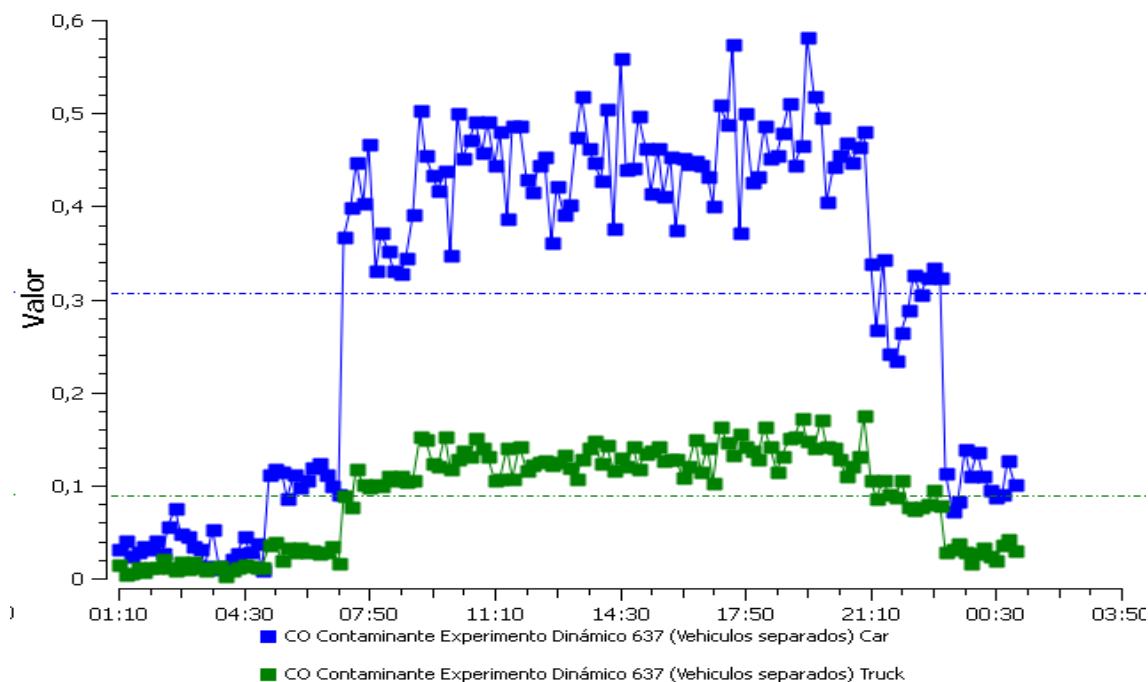


Figura 102: Emisión de CO en el Escenario 1 por vehículo

### 5.5.2.2 Emisión de contaminante HO

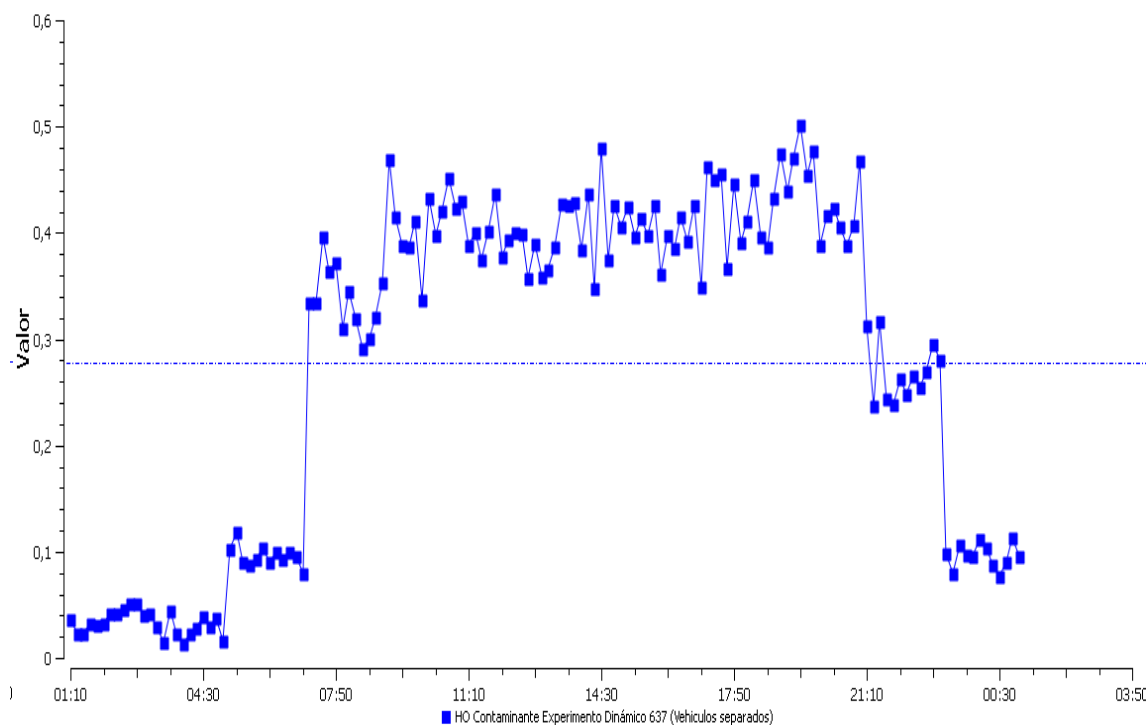


Figura 103: Emisión de HO en el Escenario 1 para todos los vehículos

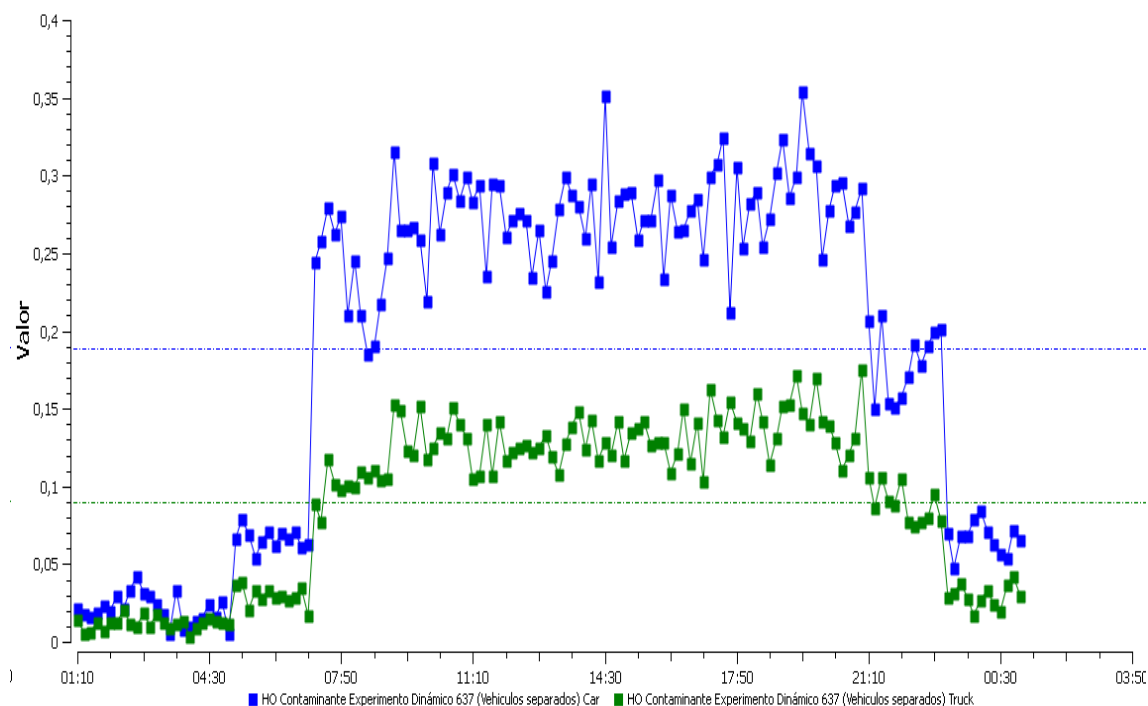


Figura 104: Emisión de HO en el Escenario 1 por vehículo

### 5.5.2.3 Emisión de contaminante NOx

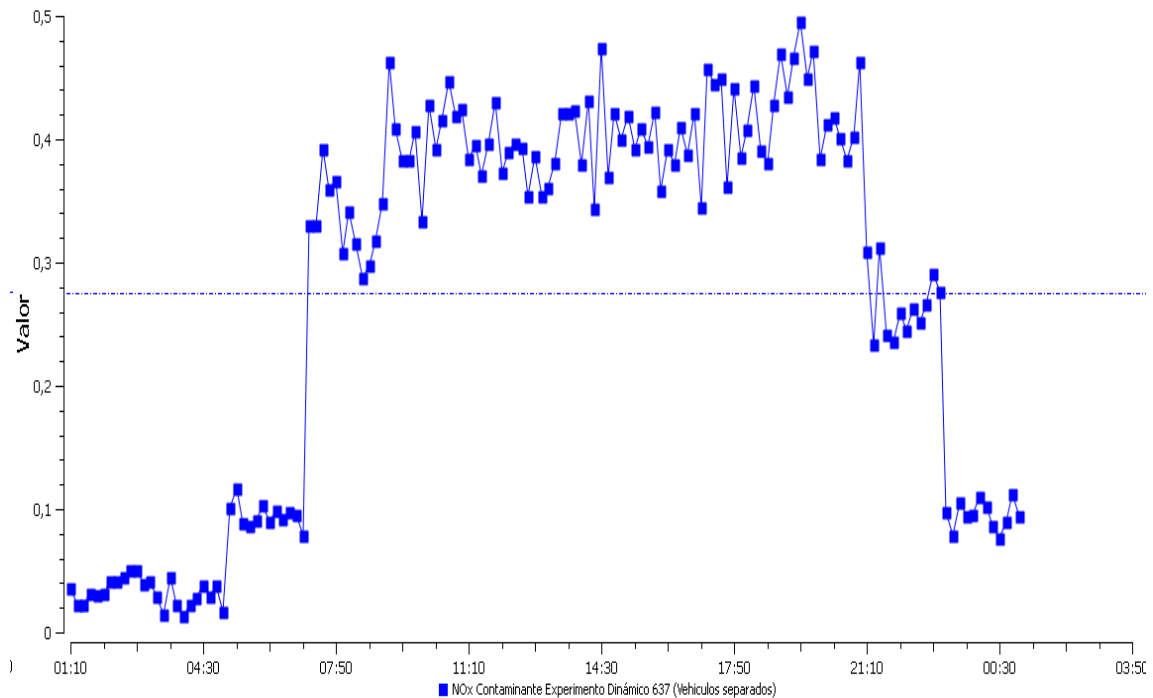


Figura 105: Emisión de NOx en el Escenario 1 para todos los vehículos

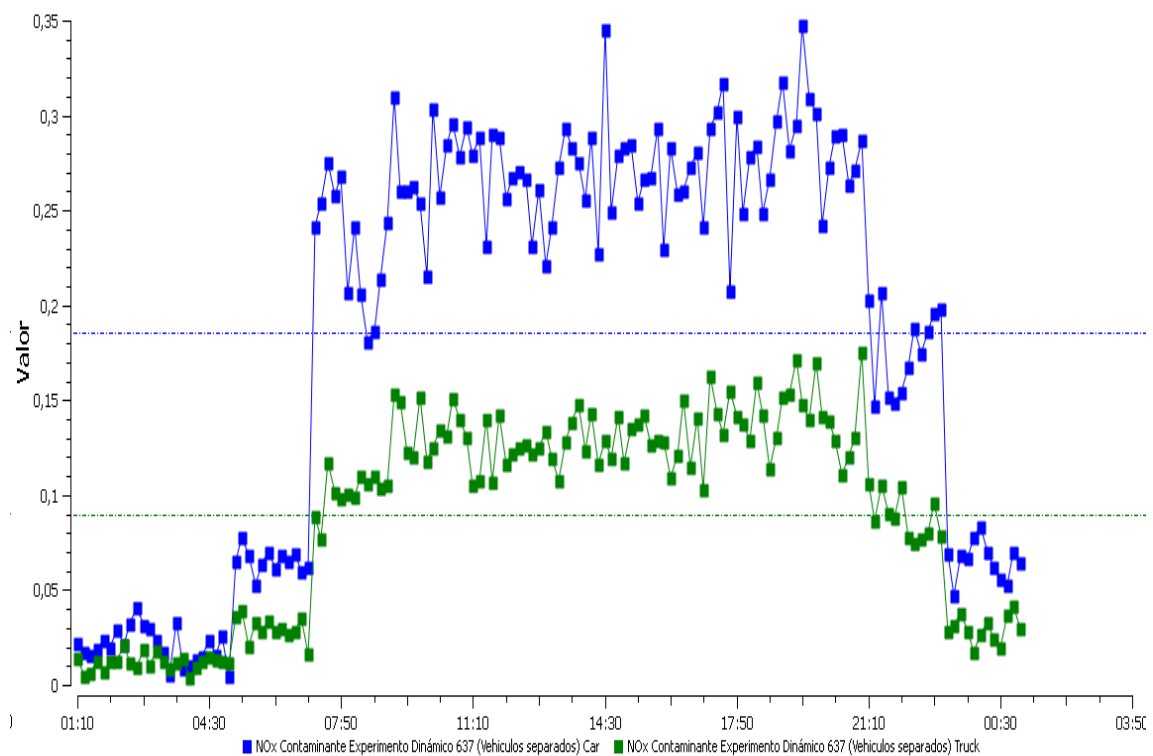


Figura 106: Emisión de NOx en el Escenario 1 por vehículo

### 5.5.2.4 Consumo de combustible

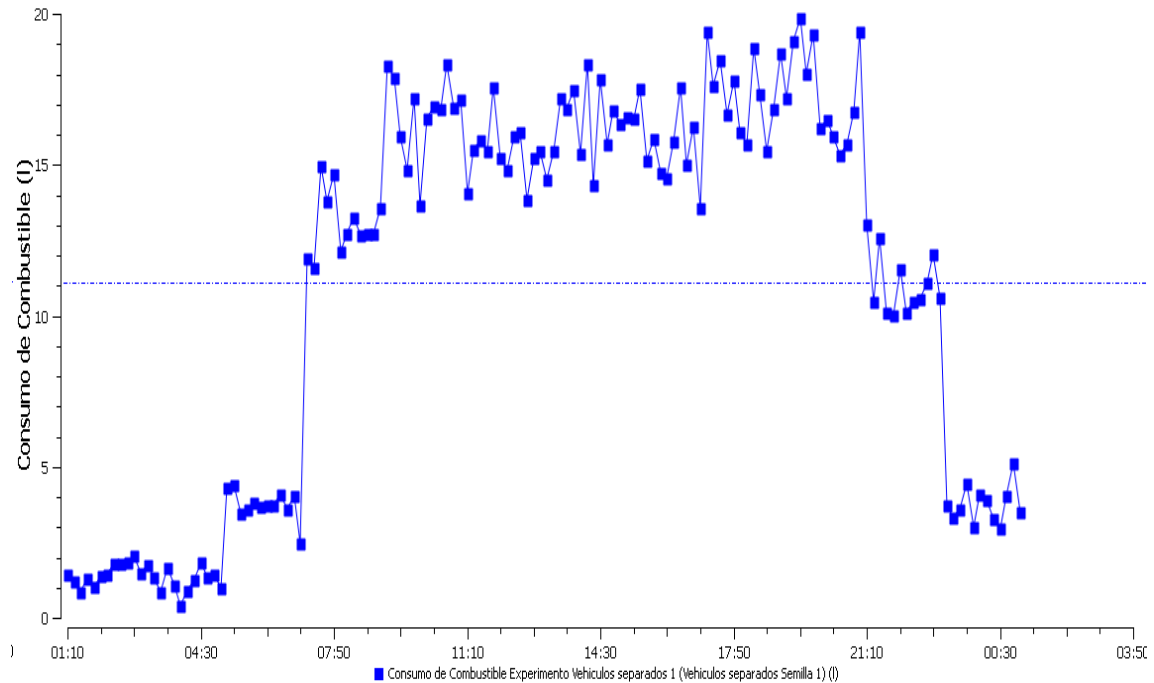


Figura 107: Combustible en el Escenario 1 para todos los vehículos

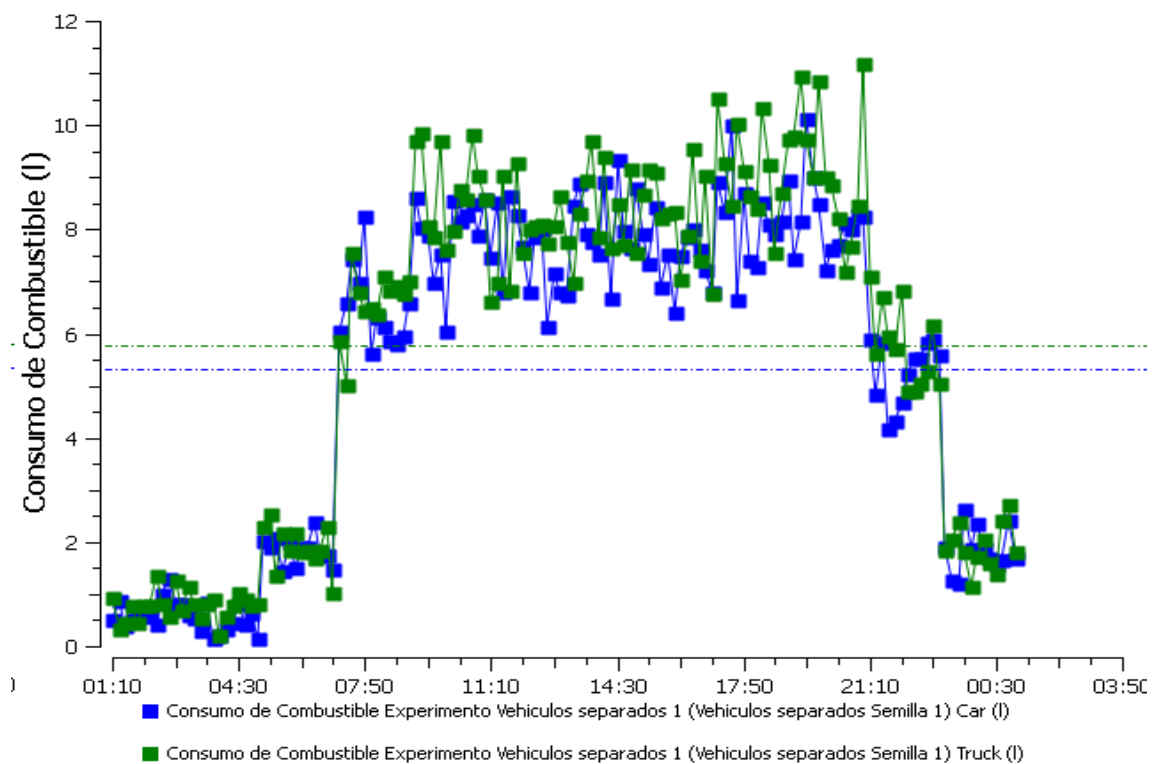


Figura 108: Combustible en el Escenario 1 por vehículo

### 5.5.2.5 Densidad

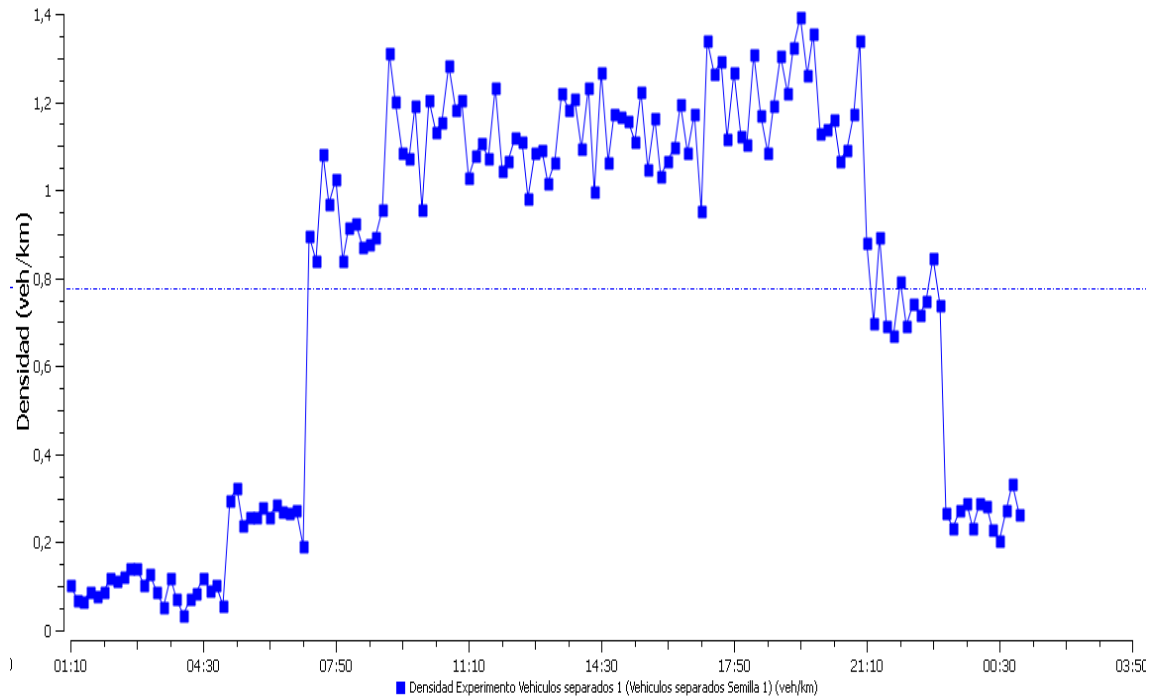


Figura 109: Densidad en el Escenario 1 para todos los vehículos

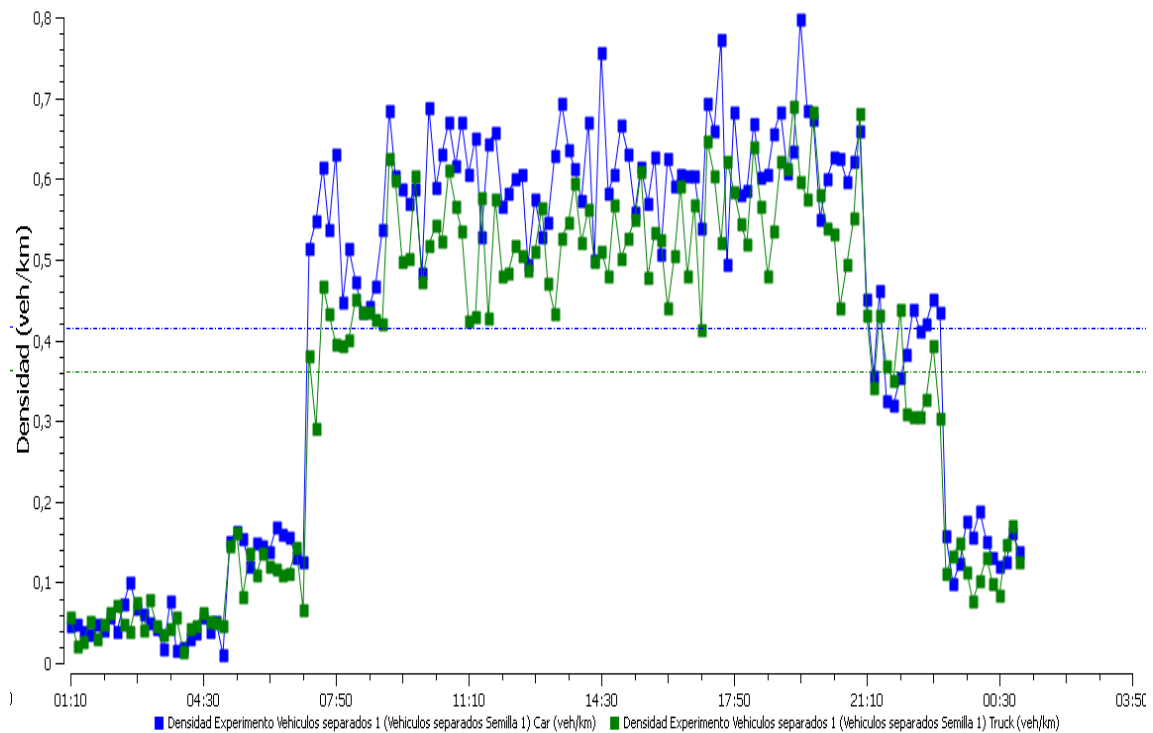


Figura 110: Densidad en el Escenario 1 por vehículo

### 5.5.2.6 Distancia total recorrida

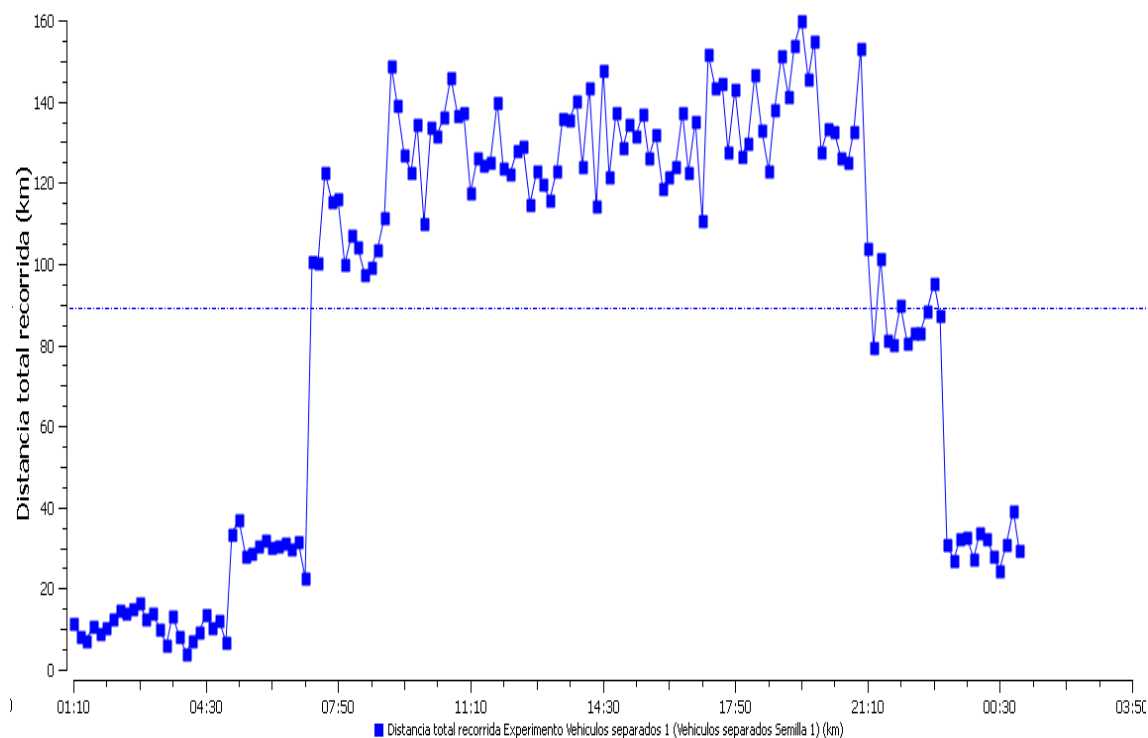


Figura 111: Distancia total en el Escenario 1 para todos los vehículos

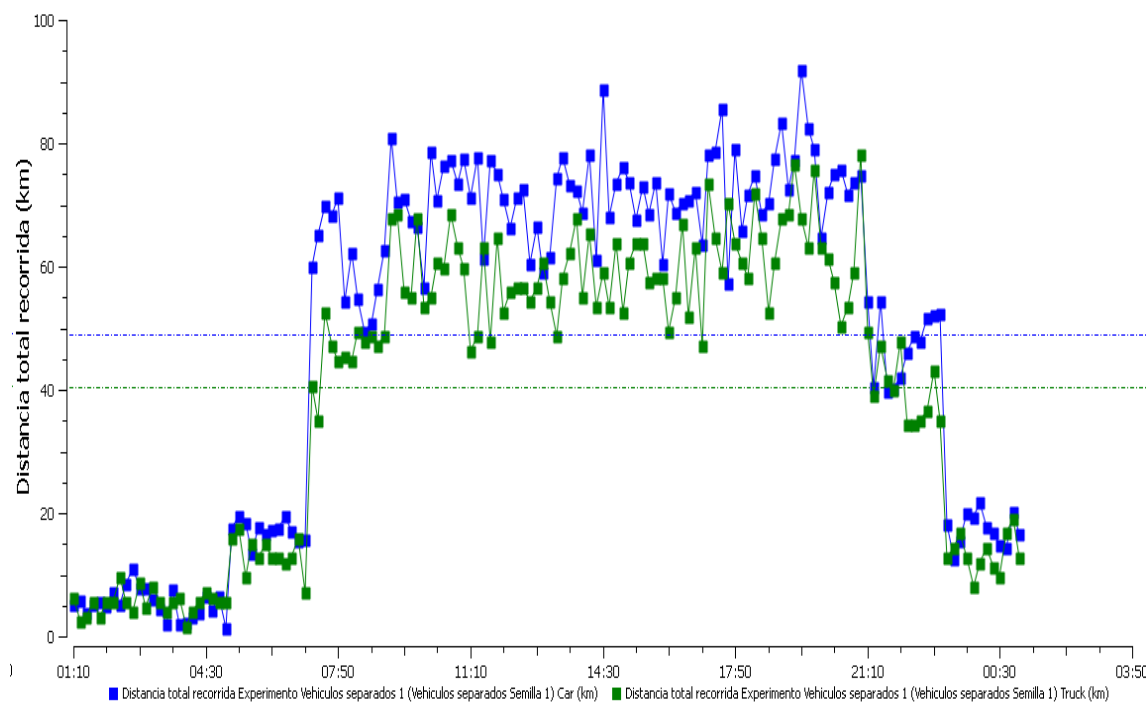


Figura 112: Distancia total en el Escenario 1 por vehículo

### 5.5.2.7 Tiempo de demora

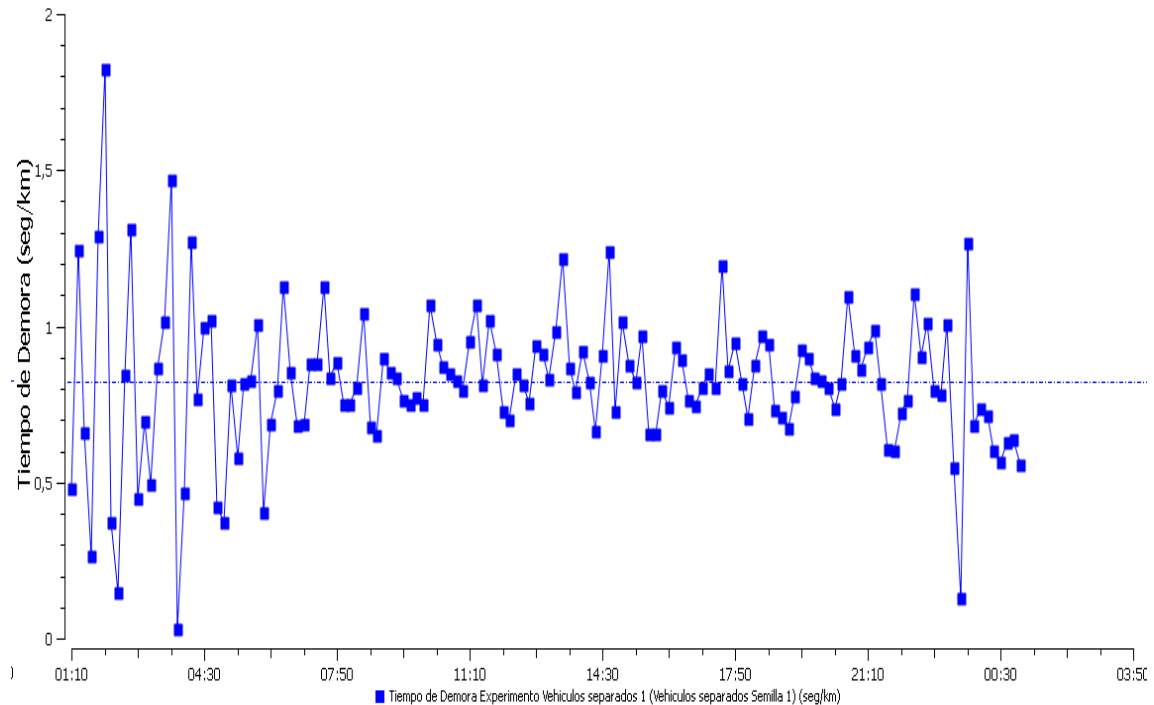


Figura 113: Tiempo de demora en el Escenario 1 para todos los vehículos

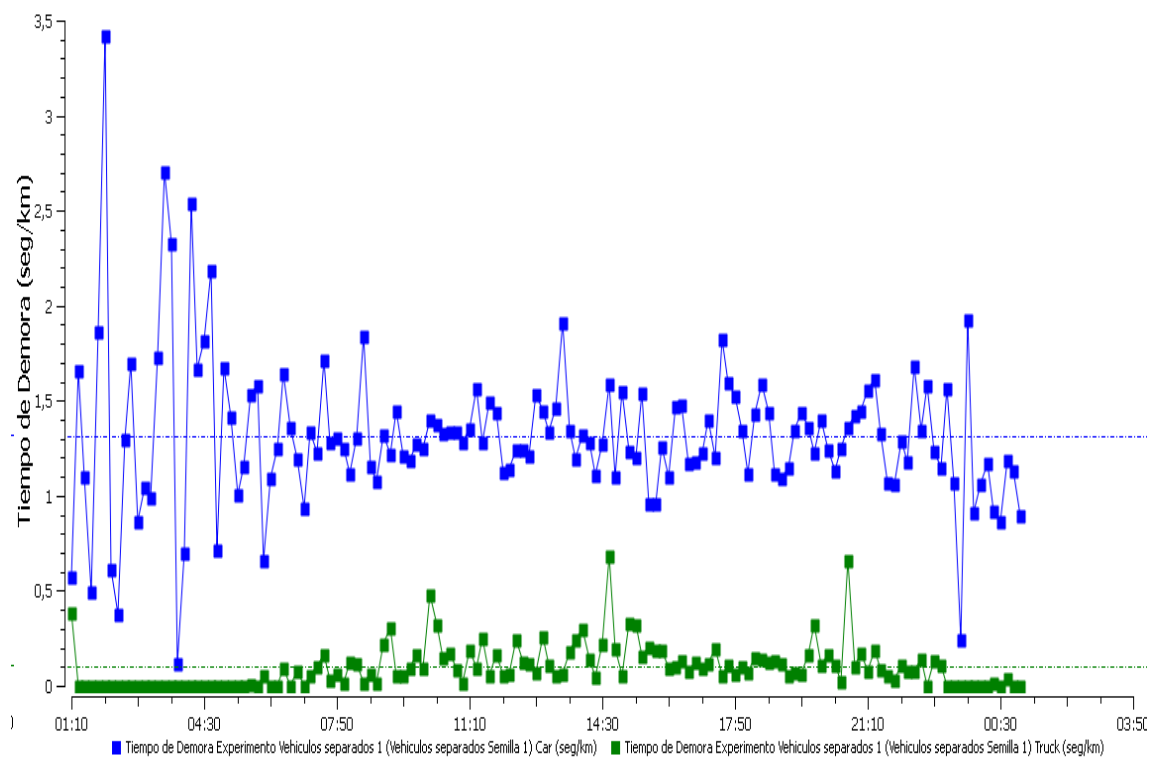


Figura 114: Tiempo de demora en el Escenario 1 por vehículo



### 5.5.2.8 Tiempo de viaje

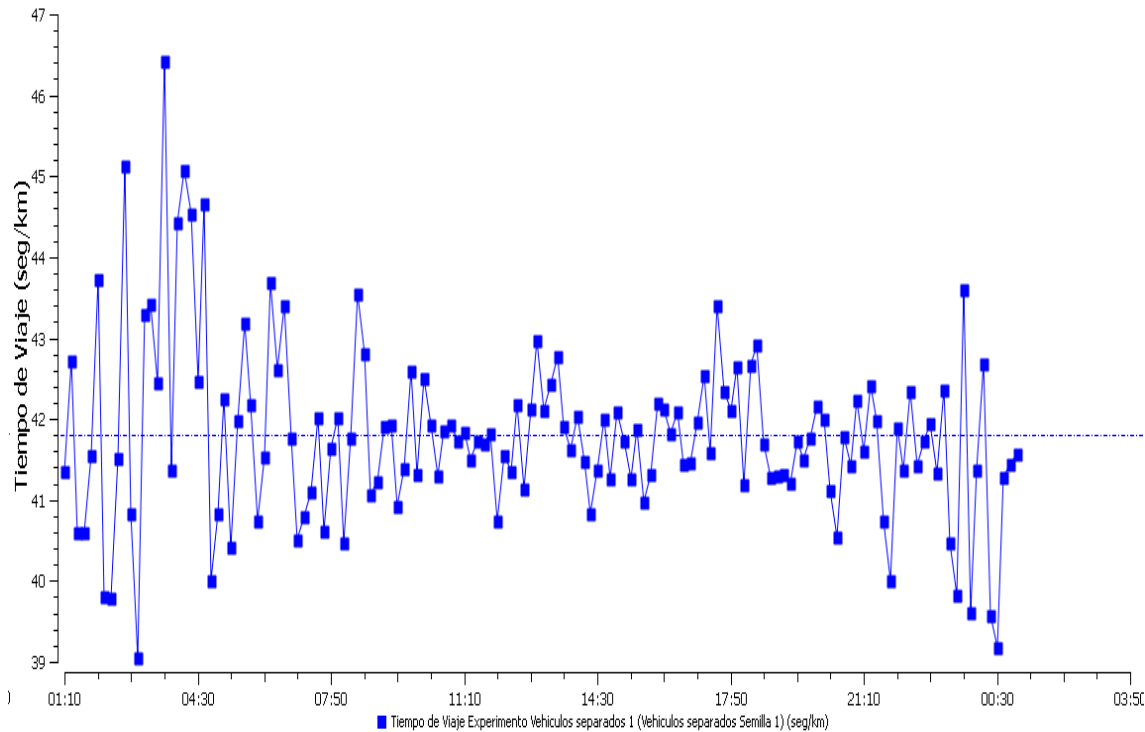


Figura 115: Tiempo de viaje en el Escenario 1 para todos los vehículos

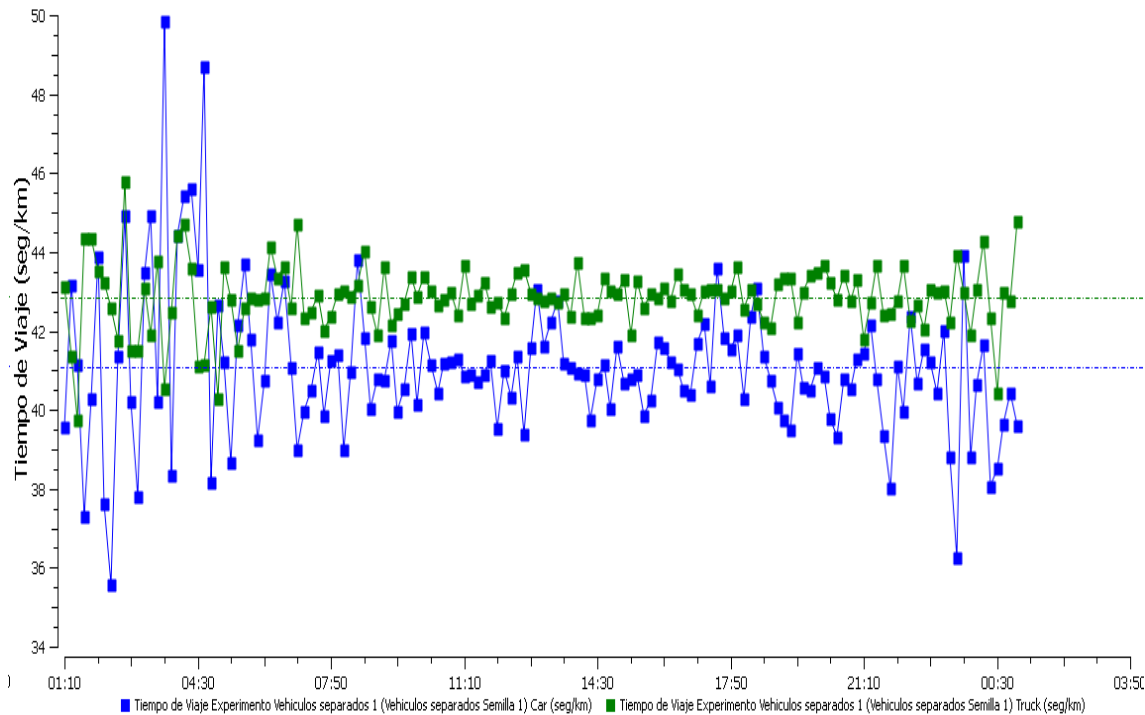


Figura 116: Tiempo de viaje en el Escenario 1 por vehículo



### 5.5.2.9 Velocidad

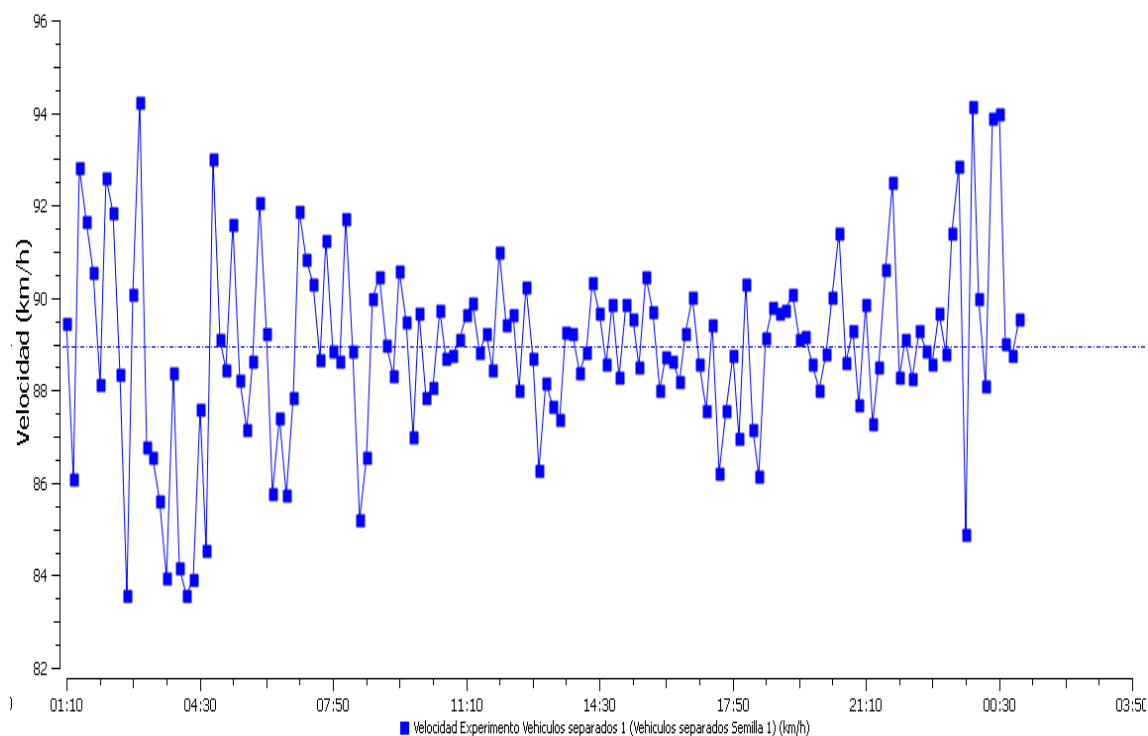


Figura 117: Tiempo de viaje en el Escenario 1 para todos los vehículos

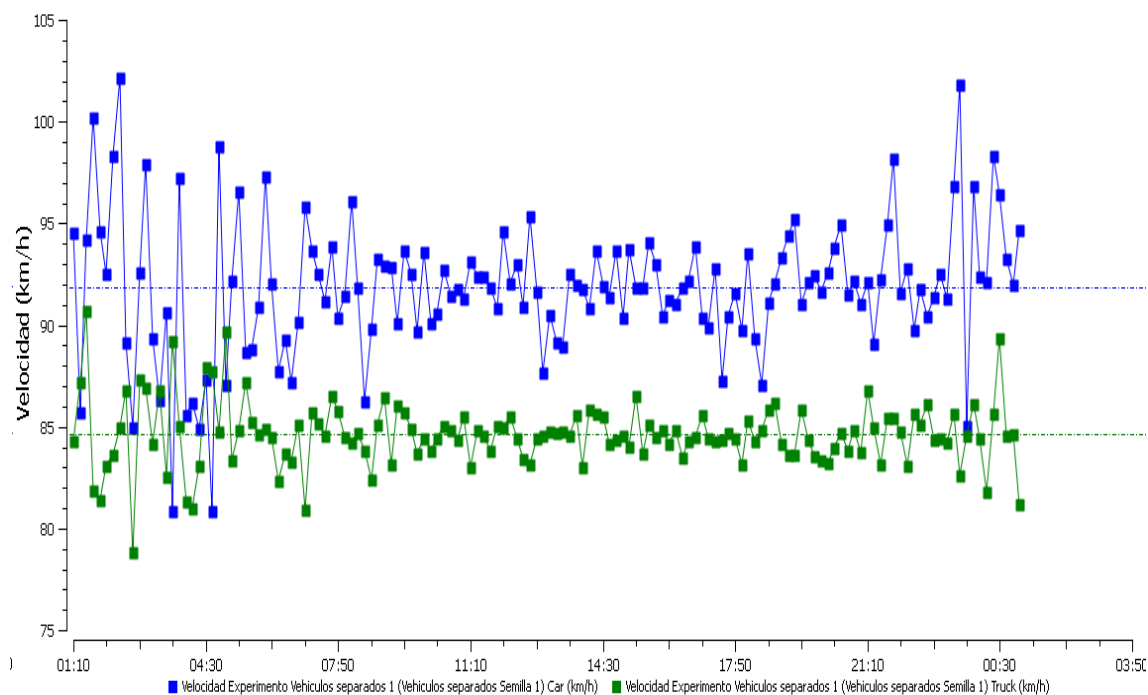


Figura 118: Tiempo de viaje en el Escenario 1 por vehículo



Se observa que la emisión de contaminantes tiene aproximadamente la misma forma de la curva de variación horaria del tráfico. Sucede lo mismo con el consumo de combustible, la distancia total recorrida y la densidad. La velocidad registra los valores máximos en las horas a las que menos vehículos circulan por la red, ya que la circulación es más fluida y el nivel de servicio que presta la vía es superior. Los tiempos de viaje mínimos se obtienen en los extremos. Como el tiempo de viaje representado por AIMSUN es un tiempo medio de todos los vehículos, al ser muy pequeño el flujo a primeras horas de la mañana, la variabilidad es muy grande. Hay que destacar que en las horas a las que el flujo de tráfico es mayor, el tiempo de viaje sigue la tendencia de la variación del número de vehículos.



### 5.5.3 Comparación de resultados y conclusiones

Emisión CO (kg)		
Escenario	Valor total	Valor medio horario
Escenario 0	59,44	0,41
Escenario 1	57,18	0,4

Distancia total recorrida (km)		
Escenario	Valor total	Valor medio horario
Escenario 0	11621,64	80,71
Escenario 1	12865,35	89,34

Emisión HO (kg)		
Escenario	Valor total	Valor medio horario
Escenario 0	38,61	0,27
Escenario 1	40,06	0,28

Tiempo de demora (s/km)		
Escenario	Valor total	Valor medio horario
Escenario 0	1,97	1,85
Escenario 1	0,85	0,85

Emisión NOx (kg)		
Escenario	Valor total	Valor medio horario
Escenario 0	37,97	0,26
Escenario 1	39,58	0,27

Tiempo de viaje (s/km)		
Escenario	Valor total	Valor medio horario
Escenario 0	44,82	44,7
Escenario 1	41,75	41,8

Consumo de combustible (l)		
Escenario	Valor total	Valor medio horario
Escenario 0	1530,31	10,63
Escenario 1	1601,44	11,12

Velocidad (km/h)		
Escenario	Valor total	Valor medio horario
Escenario 0	84,35	84,35
Escenario 1	88,98	88,98

Densidad (veh/km)		
Escenario	Valor total	Valor medio horario
Escenario 0	0,75	0,75
Escenario 1	0,78	0,78

Los valores obtenidos en la simulación de AIMSUN son valores totales, es decir, si tomamos, por ejemplo, la emisión de monóxido de carbono del *Escenario 0*, los kg totales emitidos por todos los vehículos es igual a 59,44 kg.

Una vez explicado esto, se realizará la comparación de resultados según el escenario considerado, en las siguientes páginas.



### 5.5.3.1 Comparación de distancia total recorrida

La distancia total recorrida en el *Escenario 0* por todos los vehículos es igual a 11.621 km. Para el *Escenario 1*, ésta es igual a 12.865 km. Esto significa que se recorrieron 1244 km más en el *Escenario 1* que en el *Escenario 0*, es decir un 10,7% más. Esto se debe a que AIMSUN sólo cuenta los valores de las diferentes variables, de aquellos vehículos que han entrado y salido del modelo. Esto es así porque la velocidad media de los vehículos del *Escenario 1* es superior a los del *Escenario 0*, por lo que en este último hay más vehículos que han entrado en el modelo pero no han salido.

### 5.5.3.2 Comparación de velocidad

La velocidad media ha aumentado de 84,35 km/h en el *Escenario 0* a 88,98 km/h en el *Escenario 1*. Por tanto se tiene una variación del 5,50 %. Esto supone que la movilidad de los vehículos ha aumentado, es decir, los vehículos pueden recorrer la misma distancia en menos tiempo.

### 5.5.3.3 Comparación de emisión de contaminantes

- Monóxido de Carbono (CO): La emisión de total de CO en el *Escenario 0* es igual a 59,41 kg. Como la distancia total recorrida es de 11.621 km, la emisión total cada cien kilómetros es igual a 0,51 kg. Para el *Escenario 1*, la emisión total es igual 57,18 kg. Teniendo en cuenta una distancia total recorrida de 12.865 km, la emisión cada cien kilómetros es 0,44 kg. Por tanto, la tasa de emisión ha disminuido un 12,85% en la situación teórica del *Escenario 1* respecto a la situación actual.
- Óxidos de Nitrógeno (NOx): Para el *Escenario 0* la emisión total resultó ser de 37,97 kg. Por tanto la emisión cada cien kilómetros es 0,33 kg. Para el *Escenario 1* la emisión es igual a 39,58 kg, es decir 0,31 kg/100km. Aunque la emisión total es mayor en el *Escenario 1*, el consumo cada cien kilómetros es un 6,77 % menor que en el *Escenario 0*.
- Hidrocarburos (HC): Para el *Escenario 0* la emisión total es 38,61 kg. Por tanto la emisión cada cien kilómetros es 0,33 kg. Para el *Escenario 1* la emisión es igual a 40,06 kg, es decir 0,31 kg/100km. Aunque la emisión total es mayor en el *Escenario 1*, el consumo cada cien kilómetros es un 6,32 % menor que en el *Escenario 0*.

### 5.5.3.4 Comparación de consumo de combustible

Para el *Escenario 0* el consumo total de combustible fue igual a 1530,31 l. Por tanto, el consumo medio cada cien kilómetros es igual 13,16 l. Para el *Escenario 1* el



consumo es igual a 1601,44 l, es decir 12,44 l/100km. Por tanto, el consumo medio cada cien kilómetros es un 5,50 % menor en el *Escenario 1* respecto al *Escenario 0*. El descenso en el consumo de combustible para los vehículos pesados es del 11 %, pues el consumo medio del *Escenario 0* es igual a 16,18 l/100km, frente al consumo en el *Escenario 1* de 14,32%.

### 5.5.3.5 Comparación de densidad

La densidad en el *Escenario 0* es igual a 0,75 vehículos/km. Para el *Escenario 1* ésta es igual a 0,78 vehículos/km. Por tanto ha aumentado un 4,00 %. Esto se debe a que los vehículos pesados pueden circular a una distancia menor de seguridad, ya que los tiempos de reacción de un vehículo automatizado son mucho menores que en el caso de los vehículos conducidos por humanos.

### 5.5.3.6 Comparación de tiempo de demora y viaje

El tiempo de demora para el *Escenario 0* es igual a 1,97 s/km. Para el *Escenario 1*, éste se reduce en un 56,85 % llegando a un valor de 0,85 s/km.

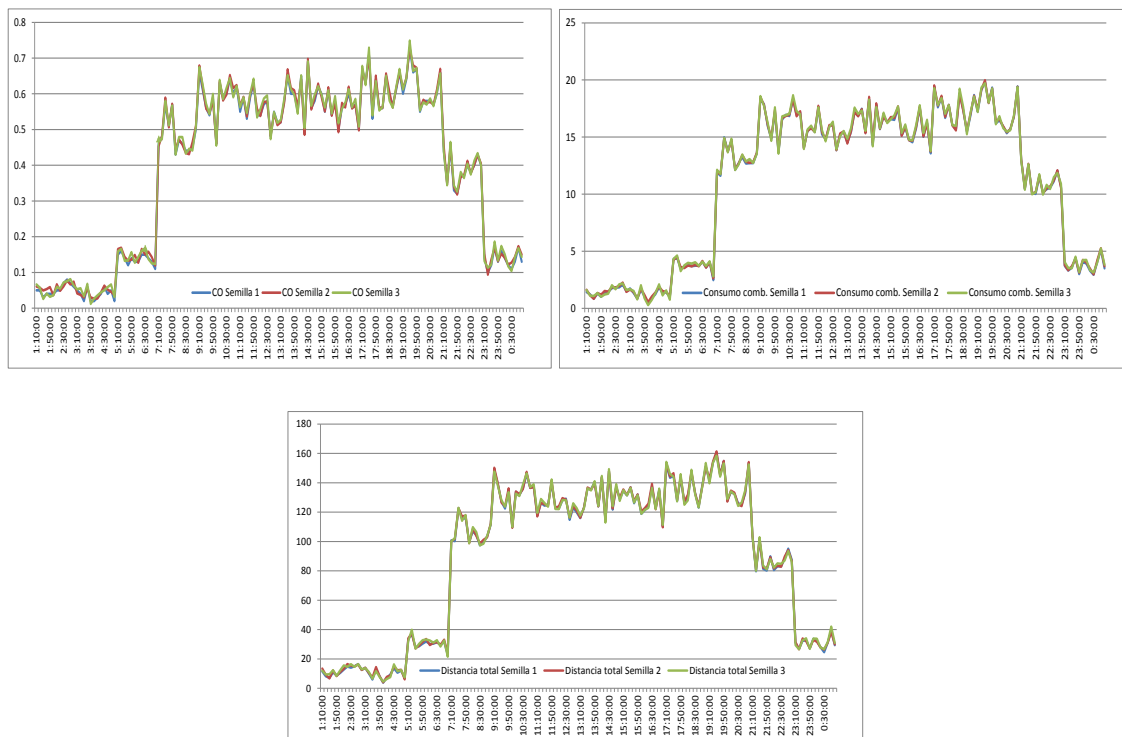
En el caso del tiempo de viaje, la reducción es de un 6,85 %, ya que el valor de éste pasa de 44,82 s/km, en el caso 0, a un valor de 41,75 en el caso 1.

Resumiendo, con la ejecución del proyecto, se consigue no sólo una mejora substancial en la seguridad y comodidad del viaje por carretera, sino que además disminuye la emisión de contaminantes a la atmósfera, el consumo de combustible, el tiempo de viaje, etc. Los vehículos pesados, se verán beneficiados ampliamente por esta revolución tecnológica. Debido a la gran superficie frontal de los mismos, estos tienen una gran resistencia al viento, por lo que con la automatización del transporte de mercancías por carretera, la distancia al vehículo predecesor será mucho menor. Por tanto la fuerza de resistencia que ejerce el viento sobre el vehículo decrecerá considerablemente. Esto hace que el consumo de combustible sea mucho menor. Además los vehículos pueden alcanzar velocidades superiores, ya que el tráfico es más fluido, por lo que las distancias se recorren en menos tiempo. Para el caso de la simulación se reduce en un 6,85 %.

## 5.5.4 Semillas

El modelo debe ser simulado a partir de diferentes semillas para demostrar que los resultados no han sido obtenidos casualmente.

Las semillas son números enteros que utilizan los simuladores informáticos como números aleatorios. Se utilizan para que dos simulaciones no sean idénticas y así poder contrastar los resultados. Se han realizado tres simulaciones con semillas diferentes. En las siguientes figuras están representados los valores de tres simulaciones distintas de tres variables: emisión de CO, consumo de combustible y distancia total recorrida.



*Figura 119: Comparación de simulaciones con diferentes semillas*

Como se puede observar en las figuras anteriores, los resultados de la simulación con diferentes semillas son muy similares. La tabla con el detalle de los valores de las gráficas anteriores se encuentra en el *Anexo I*.



# Conclusiones generales



Como se ha desarrollado en los capítulos que componen este proyecto, la implantación de la automatización del transporte de mercancías por carretera utilizando patrones ferroviarios, presenta innumerables beneficios:

- Amplia mejora de la seguridad vial, reduciendo la probabilidad de colisión en carretera, entre vehículos pesados y ligeros, a cero.
- Descongestión de vías de flujo continuo, como son las autopistas o las autovías.
- Aumento considerable de la eficiencia del transporte, debido a la reducción de la emisión de contaminantes, tiempo de viaje, consumo de combustible, etc. Es decir, se consigue una alta rentabilidad social.
- Mejora del seguimiento que las empresas pueden dar a sus vehículos, teniendo centralizada la información de toda su flota en tiempo real.
- Las empresas de transporte pueden ofrecer un mejor servicio a sus clientes pues conocen en cada instante la posición exacta de los camiones.
- Comunicación entre vehículos. Cada vehículo conoce en cada momento el estado de tramos de carretera que aún no ha alcanzado.
- Evolución de los vehículos pesados. Estos vehículos pueden ser rediseñados debido a que la cabina del conductor puede ser eliminada además de los componentes destinados a la protección en caso de accidentes. Por tanto, el peso de los vehículos sin carga puede ser reducido considerablemente.
- Aumento de la competitividad de las empresas debido a la reducción de costes de transporte. Además los vehículos de transporte ya no están supeditados a restricciones horarias debido a los descansos, que por ley, debe hacer un conductor. Esto implica, que los vehículos pueden circular, teóricamente veinticuatro horas, es decir, la empresa puede planificar sus rutas y tiempos para poder reducir el número de vehículos, ofreciendo a la vez, un servicio igual o superior.
- Posibilidad de estar a la vanguardia de la tecnología del transporte.
- Impulso de la economía debido al aumento de la competitividad de las empresas españolas.





- Las empresas inversoras pueden obtener una gran rentabilidad con la construcción de la vía destinada a la separación del tráfico.
- Generación de puestos de trabajo durante la construcción de la vía, la cual tiene una duración estimada de tres años.

Sin embargo, pese a todas las ventajas que tiene la ejecución del proyecto, presenta los siguientes inconvenientes:

- Pérdida de trabajo del personal de transporte.
- Necesidad de mano de obra cualificada para mantener los sistemas del vehículo y para realizar la planificación de las rutas.
- Tecnología actualmente en fase de desarrollo, aunque en los últimos años se están consiguiendo importantes avances.
- Impacto ambiental debido a la construcción de la nueva vía. Además, aunque la emisión de contaminantes por vehículo sea menor, si aumenta mucho la demanda de transporte debido a esta revolución tecnológica, la emisión neta será superior a la situación actual. Por otro lado, si se combina con tecnologías como motores híbridos o se desarrolla más el motor eléctrico, ofreciendo mayor autonomía, la contaminación puede reducirse en mayor medida.
- Las inversiones de gran magnitud siempre tienen un riesgo intrínseco debido a las desviaciones que pueden aparecer a lo largo de la construcción del proyecto o durante la vida de uso del mismo. Esto se debe a la imposibilidad de prever de forma exacta los valores de demanda a tan largo plazo y los imprevistos que pueden surgir durante la construcción.
- Alto coste de adquisición de los sistemas necesarios para automatizar el transporte.

Resumiendo, la automatización del transporte por carretera puede suponer una revolución tecnológica que cambiará por completo el concepto de transporte y el diseño de los vehículos. Cada vez son más las empresas que ven este sector como una oportunidad de negocio, por lo que la competitividad que genera implantar el sistema en primer lugar, para posicionarse en este nuevo mercado, puede hacer que se acelere el desarrollo de la tecnología. Los amplios beneficios sociales como la reducción considerable de muertes y accidentes en carreteras, o los beneficios que pueden obtener



las empresas, hacen que la automatización del transporte tenga un amplio interés tanto para el sector privado, como para el público.



# Glosario

CAR	<i>Centro de Automática y Robótica</i>
CSIC	<i>Consejo Superior de Investigaciones Científicas</i>
CPU	<i>Central Processing Unit (Unidad Central de Procesamiento)</i>
DGT	<i>Dirección General de Tráfico</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
FMI	<i>Fondo Monetario Internacional</i>
GPS	<i>Global Positioning System (Sistema Global de Posicionamiento)</i>
IMD	<i>Intensidad Media Diaria</i>
INE	<i>Instituto Nacional de Estadística</i>
IPC	<i>Índice de Precios de Consumo</i>
MMA	<i>Masa Máxima Autorizada</i>
PIB	<i>Producto Interior Bruto</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
USB	<i>Universal Serial Bus (Bus Universal en Serie)</i>
VAN	<i>Valor Actual Neto</i>



# Bibliografía

*Página web Dirección General de Tráfico: [www.dgt.es](http://www.dgt.es)*

*Página web Ministerio de Fomento: <http://www.fomento.gob.es>*

*Página web del Instituto Nacional de Estadística: <http://www.ine.es/>*

*Transportes. Autor Vicente Díaz López. Editor: UNED*

*Proyecto SARTRE de Volvo: <http://www.sartre-project.eu/en/Sidor/default.aspx>*

*Proyecto Fin de Carrera iCab 2. Autor: Gerardo Lara Sánchez. UC3M*

*Proyecto MIMICS Universidad de Murcia:  
[http://www.libra.inf.um.es/ants\\_vehicles/files/MimicsFomento.pdf](http://www.libra.inf.um.es/ants_vehicles/files/MimicsFomento.pdf)*

*Manual de Evaluación de Proyectos de Transporte:  
<http://www.evaluaciondeproyectos.es/EsWeb/Resultados/Manual/PDF/EsManual.pdf>*

*Manual de Usuario de AIMSUN*

*Artículo: “From Nobel Prize to Project Management: Getting Risk Right”. Project Management Journal. August 2006*





# **Anexo 1: Tablas obtenidas en la simulación**



## **Escenario 0: Estado actual**



	Emisión CO total	Emisión HO total	Emisión NOx total	Consumo combustible	Densidad	Distancia total	tiempo demora	tiempo viaje	Velocidad
1:10:00	0,07	0,04	0,04	1,68	0,12	12,81	1,89	44,0	84,84
1:20:00	0,07	0,04	0,04	1,81	0,13	12,67	2,75	47,2	79,67
1:30:00	0,06	0,04	0,04	1,53	0,12	11,69	2,15	45,3	82,71
1:40:00	0,06	0,04	0,04	1,62	0,1	12,69	1,24	44,1	86,76
1:50:00	0,06	0,04	0,04	1,36	0,1	11,52	1,66	44,3	86,36
2:00:00	0,06	0,05	0,05	1,47	0,11	13	0,89	40,4	92,55
2:10:00	0,06	0,03	0,03	1,51	0,09	10,39	1,21	45,2	80,94
2:20:00	0,04	0,03	0,03	1,07	0,09	9,44	0,77	42,5	88,33
2:30:00	0,05	0,03	0,03	1,36	0,09	10,39	1,45	44,6	84,18
2:40:00	0,05	0,04	0,04	1,32	0,1	11,19	0,89	43,3	87,38
2:50:00	0,07	0,05	0,05	1,61	0,13	13,62	1,12	43,7	86,22
3:00:00	0,06	0,04	0,04	1,66	0,12	12,21	1,74	45,5	82,70
3:10:00	0,06	0,04	0,03	1,49	0,1	11,02	2,06	45,1	83,52
3:20:00	0,06	0,04	0,04	1,37	0,09	11,02	1,08	41,2	91,19
3:30:00	0,06	0,03	0,03	1,55	0,1	11,04	1,58	45,4	82,20
3:40:00	0,03	0,02	0,02	0,86	0,06	7,15	0,74	42,6	88,06
3:50:00	0,03	0,02	0,02	1,04	0,07	7,12	1,63	47,0	81,82
4:00:00	0,06	0,04	0,04	1,59	0,11	11,69	1,04	43,5	84,57
4:10:00	0,03	0,01	0,01	0,74	0,05	4,54	3,03	50,7	71,48
4:20:00	0,04	0,02	0,02	0,89	0,06	6,36	1,98	47,6	78,34
4:30:00	0,03	0,02	0,02	0,6	0,05	5,85	0,84	42,2	89,63
4:40:00	0,04	0,03	0,03	1,15	0,08	8,78	1,75	44,0	86,23
4:50:00	0,04	0,03	0,03	0,97	0,08	9,08	1,16	42,7	89,41
5:00:00	0,04	0,03	0,03	0,8	0,07	7,17	1,37	42,5	91,40
5:10:00	0,15	0,11	0,11	4,43	0,32	33,47	1,64	45,1	83,02
5:20:00	0,15	0,09	0,09	4,06	0,26	30,41	1,75	43,3	88,88
5:30:00	0,19	0,13	0,12	5,04	0,35	38,98	1,26	42,9	86,63
5:40:00	0,13	0,09	0,09	3,39	0,24	25,96	1,49	43,9	85,43
5:50:00	0,13	0,10	0,10	3,38	0,25	28,1	1,25	42,9	88,11
6:00:00	0,22	0,15	0,14	5,18	0,38	42,08	1,80	43,3	86,87
6:10:00	0,12	0,07	0,07	2,77	0,2	21,43	1,41	44,7	84,48
6:20:00	0,12	0,09	0,09	3,47	0,26	26,5	1,82	45,3	83,94
6:30:00	0,16	0,11	0,11	4,5	0,31	34,41	1,49	44,2	84,79
6:40:00	0,15	0,10	0,10	3,14	0,22	27,29	1,02	39,4	94,59
6:50:00	0,15	0,09	0,09	3,55	0,25	27,64	1,54	43,5	87,23
7:00:00	0,19	0,12	0,12	4,8	0,33	36,25	1,52	44,3	84,77
7:10:00	0,46	0,31	0,30	12,25	0,9	92,13	2,20	45,7	83,02
7:20:00	0,51	0,33	0,33	12,57	0,89	99,61	1,43	43,8	85,84
7:30:00	0,47	0,31	0,30	12,84	0,9	95,54	1,86	44,8	84,53
7:40:00	0,52	0,33	0,32	13,92	0,97	99,07	2,19	45,8	82,74
7:50:00	0,46	0,30	0,29	12,67	0,84	94,35	1,93	43,8	86,29
8:00:00	0,52	0,35	0,34	14,03	1	105,13	1,95	45,4	83,24
8:10:00	0,52	0,34	0,33	13,76	0,96	101,46	2,14	45,4	82,88
8:20:00	0,49	0,33	0,32	13,08	0,91	100,45	1,69	43,7	86,27
8:30:00	0,49	0,31	0,30	12,3	0,85	93,23	1,68	44,1	84,82
8:40:00	0,45	0,29	0,29	11,11	0,8	85,96	1,97	44,3	85,12
8:50:00	0,51	0,34	0,34	14,21	1,02	105,09	2,23	46,7	80,49
9:00:00	0,48	0,31	0,31	12,16	0,87	93,17	2,00	44,7	84,58
9:10:00	0,68	0,44	0,44	17,57	1,24	133,13	2,25	45,3	84,37
9:20:00	0,62	0,39	0,39	16,8	1,17	120,94	2,47	46,0	82,36
9:30:00	0,63	0,41	0,40	17,67	1,21	127,99	2,35	45,7	81,67
9:40:00	0,63	0,42	0,41	16,35	1,16	124,27	1,67	44,5	84,08
9:50:00	0,58	0,39	0,38	15,64	1,1	118,31	2,19	45,3	84,18
10:00:00	0,63	0,40	0,39	15,84	1,15	117,55	2,25	45,7	82,77
10:10:00	0,65	0,43	0,42	17,48	1,19	133,42	1,92	44,0	85,58
10:20:00	0,57	0,38	0,37	14,37	1,06	110,31	2,00	45,4	83,57
10:30:00	0,66	0,43	0,42	16,98	1,18	132,27	1,94	43,9	86,28
10:40:00	0,69	0,45	0,44	17,44	1,22	131,56	2,34	45,4	83,99
10:50:00	0,63	0,39	0,39	16,17	1,14	119,3	1,93	45,0	83,53
11:00:00	0,71	0,48	0,48	16,64	1,25	136,5	1,47	43,0	87,69
11:10:00	0,59	0,37	0,36	14,63	1,03	109,98	2,05	45,4	83,64
11:20:00	0,59	0,39	0,38	14,94	1,06	114,61	1,87	44,2	85,32
11:30:00	0,63	0,40	0,39	15,64	1,07	119,86	2,01	44,1	85,75
11:40:00	0,61	0,38	0,37	15,3	1,07	113,29	2,15	45,2	83,45





	<b>Emisión CO total</b>	<b>Emisión HO total</b>	<b>Emisión NOx total</b>	<b>Consumo combustible</b>	<b>Densidad</b>	<b>Distancia total</b>	<b>tiempo demora</b>	<b>tiempo viaje</b>	<b>Velocidad</b>
11:50:00	0,51	0,33	0,32	13,72	0,94	101,6	1,96	45,3	82,65
12:00:00	0,59	0,39	0,38	15,25	1,11	116	2,04	45,2	83,64
12:10:00	0,63	0,40	0,39	15,98	1,12	119,17	2,61	45,6	83,23
12:20:00	0,60	0,39	0,39	15,62	1,12	118,82	2,13	45,7	82,93
12:30:00	0,52	0,33	0,33	13,88	0,98	101,4	2,19	45,7	82,70
12:40:00	0,54	0,37	0,37	13,86	0,99	109,63	1,75	44,9	84,96
12:50:00	0,52	0,31	0,31	13,93	0,97	98,41	2,14	46,1	81,77
13:00:00	0,61	0,38	0,37	15,4	1,05	117,28	1,63	43,7	85,75
13:10:00	0,63	0,41	0,40	15,35	1,1	119,02	2,05	44,4	85,36
13:20:00	0,54	0,35	0,35	13,31	0,97	104,44	1,65	43,9	85,79
13:30:00	0,65	0,43	0,42	16,44	1,17	125,52	2,15	44,6	84,90
13:40:00	0,68	0,46	0,45	16,83	1,19	134,78	1,61	42,8	87,37
13:50:00	0,55	0,37	0,36	14,49	1,04	111,35	1,79	44,6	84,19
14:00:00	0,59	0,40	0,39	16,1	1,13	121,69	1,75	44,2	85,11
14:10:00	0,63	0,38	0,37	15,78	1,09	115,81	2,29	45,8	82,50
14:20:00	0,61	0,41	0,41	15,52	1,11	122,95	1,68	43,2	87,12
14:30:00	0,60	0,39	0,39	15,69	1,11	119,3	1,91	44,9	83,87
14:40:00	0,72	0,44	0,43	19,23	1,29	135,82	2,29	46,4	81,29
14:50:00	0,65	0,41	0,41	15,88	1,13	121,72	2,12	44,5	85,14
15:00:00	0,63	0,41	0,40	17,02	1,17	126,6	1,99	44,8	84,13
15:10:00	0,58	0,38	0,37	15,18	1,07	113,54	1,74	44,6	84,38
15:20:00	0,60	0,41	0,41	15,76	1,13	121,5	2,76	45,9	82,50
15:30:00	0,61	0,39	0,38	14,63	1,05	114,16	2,01	44,0	86,54
15:40:00	0,56	0,35	0,35	13,25	0,96	102,17	1,56	44,4	84,85
15:50:00	0,64	0,40	0,39	17,3	1,16	126,31	2,23	45,0	83,79
16:00:00	0,54	0,33	0,32	14,13	0,97	101,32	2,27	45,9	81,72
16:10:00	0,55	0,37	0,36	14,26	1,05	110,24	1,87	44,7	84,56
16:20:00	0,62	0,39	0,38	15,71	1,09	118,59	2,12	44,9	84,20
16:30:00	0,58	0,39	0,38	15,1	1,09	114,72	2,22	45,2	83,49
16:40:00	0,58	0,39	0,38	15,83	1,11	118,97	1,89	44,4	84,31
16:50:00	0,59	0,39	0,39	14,78	1,02	117,38	1,92	43,1	87,64
17:00:00	0,54	0,35	0,35	13,89	1	105,43	2,09	45,6	82,83
17:10:00	0,65	0,42	0,41	16,32	1,17	126,12	1,86	45,1	84,26
17:20:00	0,55	0,36	0,35	14,12	1	105,26	2,32	45,5	83,71
17:30:00	0,57	0,36	0,36	16,17	1,08	115,69	2,10	45,8	82,02
17:40:00	0,57	0,40	0,39	15,02	1,09	118,35	1,80	44,1	85,89
17:50:00	0,61	0,39	0,38	15,61	1,1	118,08	1,97	44,2	84,93
18:00:00	0,69	0,44	0,43	17,12	1,22	130,86	2,04	44,9	83,67
18:10:00	0,66	0,44	0,43	16,34	1,19	128,38	2,03	44,2	85,45
18:20:00	0,63	0,41	0,40	14,76	1,08	117,64	2,40	44,6	84,94
18:30:00	0,63	0,42	0,41	15,02	1,12	122,57	1,62	43,6	86,25
18:40:00	0,68	0,45	0,44	17,11	1,24	131,17	1,99	45,1	83,75
18:50:00	0,67	0,43	0,42	16,41	1,17	126,41	2,01	44,9	84,78
19:00:00	0,57	0,36	0,35	14,47	1,03	107,68	1,99	46,2	82,16
19:10:00	0,68	0,42	0,42	17,01	1,23	126	2,47	46,1	82,13
19:20:00	0,65	0,44	0,43	18,09	1,27	135,09	2,01	45,5	82,77
19:30:00	0,64	0,42	0,42	16,07	1,16	124,5	2,22	45,0	83,88
19:40:00	0,64	0,41	0,41	16,77	1,16	125,85	1,76	43,9	85,72
19:50:00	0,61	0,37	0,37	16,42	1,09	117,31	2,21	45,7	82,69
20:00:00	0,61	0,40	0,39	15,89	1,11	118,83	2,04	45,4	82,87
20:10:00	0,56	0,37	0,37	14	1,01	110,56	1,99	43,4	87,10
20:20:00	0,61	0,41	0,40	15,92	1,14	119,49	2,18	45,0	84,18
20:30:00	0,61	0,38	0,38	14,95	1,04	114,63	1,83	44,9	83,89
20:40:00	0,58	0,37	0,36	15,43	1,05	114,78	1,87	44,2	84,86
20:50:00	0,67	0,43	0,42	17,4	1,23	131,43	1,86	44,2	84,52
21:00:00	0,68	0,44	0,44	18,09	1,26	136,76	2,18	44,9	84,28
21:10:00	0,42	0,26	0,25	10,44	0,76	76,81	2,59	47,0	80,73
21:20:00	0,32	0,22	0,21	8,2	0,58	64,41	1,57	43,6	86,24
21:30:00	0,42	0,27	0,27	11,77	0,79	85,99	2,43	45,6	84,21
21:40:00	0,42	0,27	0,26	11,21	0,78	82,67	2,12	45,6	83,32
21:50:00	0,35	0,23	0,23	9,26	0,66	71,13	1,67	44,4	84,65
22:00:00	0,39	0,25	0,25	9,9	0,69	76	1,76	44,0	86,13
22:10:00	0,39	0,25	0,24	9,04	0,67	70,72	1,69	44,9	84,34
22:20:00	0,31	0,20	0,20	7,79	0,55	61,45	1,66	44,0	85,35
22:30:00	0,43	0,28	0,27	11,04	0,79	83,19	2,08	45,7	83,08



	Emisión CO total	Emisión HO total	Emisión NOx total	Consumo combustible	Densidad	Distancia total	tiempo demora	tiempo viaje	Velocidad
22:40:00	0,39	0,26	0,25	9,89	0,71	75,77	1,63	44,8	84,19
22:50:00	0,41	0,27	0,27	9,79	0,71	77,73	1,86	44,3	85,45
23:00:00	0,40	0,27	0,27	10,72	0,76	81,82	1,81	43,9	86,53
23:10:00	0,11	0,08	0,08	3,32	0,22	24,96	1,50	45,0	84,20
23:20:00	0,15	0,09	0,09	3,88	0,29	28,25	2,16	48,6	77,73
23:30:00	0,16	0,11	0,11	4,16	0,3	31,26	1,84	45,6	83,80
23:40:00	0,14	0,09	0,09	3,36	0,25	27,01	1,60	43,7	87,07
23:50:00	0,12	0,08	0,08	3,47	0,23	25,12	1,75	46,1	81,09
0:00:00	0,15	0,10	0,10	4,34	0,3	32,34	1,61	44,4	84,87
0:10:00	0,12	0,09	0,09	3,35	0,26	25,71	1,80	46,7	82,57
0:20:00	0,15	0,09	0,09	3,57	0,25	26,48	2,24	45,5	83,54
0:30:00	0,16	0,10	0,09	4,12	0,28	29,88	1,54	43,9	84,47
0:40:00	0,14	0,11	0,10	4,1	0,29	33,32	1,22	42,7	88,38
0:50:00	0,13	0,09	0,08	3,4	0,25	26,36	1,70	45,1	84,24
1:00:00	0,16	0,11	0,11	3,53	0,27	30,75	1,64	42,4	90,31
Total	59,4	38,6	37,9	1530,31	0,75	11621,64	1,97	44,8	84,58
Media horaria	0,41	0,27	0,26	10,63	0,75	80,71	1,85	44,7	84,58



# Escenario 1: Separación del tráfico



	Emisión CO total	Emisión HO total	Emisión NOx total	Consumo combustible	Densidad	Distancia total	tiempo demora	tiempo viaje	Velocidad
1:10:00	0,05	0,04	0,04	1,44	0,1	11,58	0,48	41,35	89,45
1:20:00	0,05	0,02	0,02	1,22	0,07	8,23	1,24	42,71	86,08
1:30:00	0,03	0,02	0,02	0,85	0,07	7,1	0,66	40,60	92,82
1:40:00	0,04	0,03	0,03	1,31	0,09	10,78	0,26	40,60	91,66
1:50:00	0,04	0,03	0,03	1,02	0,08	8,86	1,29	41,55	90,54
2:00:00	0,04	0,03	0,03	1,38	0,09	10,43	1,83	43,73	88,12
2:10:00	0,05	0,04	0,04	1,44	0,12	12,74	0,37	39,80	92,60
2:20:00	0,05	0,04	0,04	1,78	0,11	14,78	0,15	39,79	91,85
2:30:00	0,07	0,05	0,04	1,82	0,12	14,03	0,84	41,51	88,34
2:40:00	0,08	0,05	0,05	1,85	0,14	15,01	1,31	45,12	83,58
2:50:00	0,07	0,05	0,05	2,08	0,14	16,58	0,45	40,84	90,08
3:00:00	0,06	0,04	0,04	1,5	0,1	12,59	0,70	39,05	94,25
3:10:00	0,05	0,04	0,04	1,74	0,13	13,95	0,50	43,29	86,79
3:20:00	0,04	0,03	0,03	1,34	0,09	10,11	0,87	43,43	86,57
3:30:00	0,02	0,01	0,01	0,86	0,05	5,94	1,02	42,44	85,60
3:40:00	0,06	0,05	0,04	1,64	0,12	13,16	1,47	46,43	83,97
3:50:00	0,02	0,02	0,02	1,06	0,07	8,33	0,03	41,37	88,38
4:00:00	0,02	0,01	0,01	0,42	0,03	3,88	0,47	44,44	84,17
4:10:00	0,03	0,02	0,02	0,89	0,07	7,22	1,27	45,08	83,58
4:20:00	0,04	0,03	0,03	1,24	0,09	9,46	0,77	44,53	83,93
4:30:00	0,06	0,04	0,04	1,85	0,12	13,7	1,00	42,47	87,61
4:40:00	0,04	0,03	0,03	1,34	0,09	10,6	1,02	44,66	84,54
4:50:00	0,05	0,04	0,04	1,44	0,1	12,09	0,42	40,01	93,02
5:00:00	0,02	0,02	0,02	0,97	0,06	6,89	0,37	40,83	89,12
5:10:00	0,15	0,10	0,10	4,32	0,3	33,48	0,81	42,25	88,44
5:20:00	0,16	0,12	0,12	4,43	0,32	37,06	0,58	40,43	91,59
5:30:00	0,14	0,09	0,09	3,46	0,24	28,1	0,82	41,98	88,23
5:40:00	0,12	0,09	0,09	3,61	0,26	28,61	0,83	43,19	87,15
5:50:00	0,14	0,09	0,09	3,82	0,26	30,42	1,01	42,18	88,64
6:00:00	0,13	0,10	0,10	3,7	0,28	31,85	0,40	40,75	92,08
6:10:00	0,13	0,09	0,09	3,74	0,26	30,18	0,69	41,54	89,23
6:20:00	0,15	0,10	0,10	3,74	0,28	30,4	0,80	43,69	85,78
6:30:00	0,15	0,09	0,09	4,08	0,27	31,44	1,13	42,62	87,42
6:40:00	0,14	0,10	0,10	3,59	0,27	29,76	0,86	43,41	85,75
6:50:00	0,13	0,10	0,10	4,04	0,27	31,55	0,69	41,78	87,87
7:00:00	0,11	0,08	0,08	2,48	0,19	22,81	0,69	40,50	91,89
7:10:00	0,46	0,33	0,33	11,91	0,9	100,78	0,88	40,80	90,83
7:20:00	0,48	0,33	0,33	11,62	0,84	100,28	0,88	41,10	90,29
7:30:00	0,57	0,40	0,39	14,98	1,08	122,67	1,13	42,02	88,68
7:40:00	0,51	0,36	0,36	13,78	0,97	115,43	0,84	40,62	91,26
7:50:00	0,57	0,37	0,37	14,7	1,02	116,04	0,89	41,64	88,85
8:00:00	0,43	0,31	0,31	12,13	0,84	99,82	0,75	42,02	88,64
8:10:00	0,47	0,34	0,34	12,71	0,92	107,02	0,75	40,48	91,72
8:20:00	0,46	0,32	0,32	13,25	0,93	104,22	0,80	41,78	88,86
8:30:00	0,44	0,29	0,29	12,68	0,87	97,34	1,04	43,54	85,21
8:40:00	0,44	0,30	0,30	12,72	0,88	99,37	0,68	42,80	86,58
8:50:00	0,45	0,32	0,32	12,72	0,89	103,51	0,65	41,06	90,01
9:00:00	0,50	0,35	0,35	13,59	0,96	111,4	0,90	41,23	90,46
9:10:00	0,66	0,47	0,46	18,31	1,31	148,82	0,85	41,92	88,97
9:20:00	0,61	0,41	0,41	17,88	1,2	139,16	0,84	41,93	88,33
9:30:00	0,56	0,39	0,38	15,97	1,09	126,93	0,76	40,92	90,58
9:40:00	0,54	0,39	0,38	14,85	1,07	122,43	0,75	41,40	89,49
9:50:00	0,59	0,41	0,41	17,23	1,19	134,35	0,77	42,59	87,00
10:00:00	0,46	0,34	0,33	13,67	0,96	110,15	0,75	41,33	89,66
10:10:00	0,63	0,43	0,43	16,53	1,21	133,8	1,07	42,50	87,85
10:20:00	0,59	0,40	0,39	16,95	1,13	131,52	0,94	41,92	88,06
10:30:00	0,60	0,42	0,42	16,85	1,15	136,19	0,87	41,30	89,74
10:40:00	0,64	0,45	0,45	18,34	1,28	146,02	0,85	41,86	88,71
10:50:00	0,60	0,42	0,42	16,92	1,18	136,54	0,83	41,94	88,77
11:00:00	0,62	0,43	0,43	17,19	1,21	137,32	0,80	41,73	89,10
11:10:00	0,55	0,39	0,38	14,08	1,03	117,53	0,95	41,84	89,66
11:20:00	0,59	0,40	0,40	15,51	1,08	126,36	1,07	41,50	89,88
11:30:00	0,53	0,38	0,37	15,84	1,11	124,41	0,81	41,73	88,84
11:40:00	0,59	0,40	0,40	15,46	1,07	125,15	1,02	41,69	89,23



	Emisión CO total	Emisión HO total	Emisión NOx total	Consumo combustible	Densidad	Distancia total	tiempo demora	tiempo viaje	Velocidad
11:50:00	0,63	0,44	0,43	17,56	1,23	139,76	0,91	41,83	88,46
12:00:00	0,54	0,38	0,37	15,25	1,05	123,67	0,73	40,74	90,99
12:10:00	0,54	0,39	0,39	14,82	1,07	122,2	0,70	41,56	89,44
12:20:00	0,57	0,40	0,40	15,95	1,12	127,98	0,85	41,35	89,65
12:30:00	0,58	0,40	0,39	16,1	1,11	129,18	0,82	42,19	88,02
12:40:00	0,48	0,36	0,35	13,86	0,98	114,73	0,75	41,14	90,25
12:50:00	0,55	0,39	0,39	15,23	1,08	123,09	0,94	42,13	88,71
13:00:00	0,52	0,36	0,35	15,46	1,09	119,77	0,91	42,97	86,28
13:10:00	0,52	0,37	0,36	14,51	1,02	115,91	0,83	42,10	88,16
13:20:00	0,58	0,39	0,38	15,45	1,06	123,14	0,98	42,44	87,66
13:30:00	0,65	0,43	0,42	17,19	1,22	135,99	1,22	42,77	87,38
13:40:00	0,60	0,43	0,42	16,86	1,18	135,56	0,87	41,91	89,26
13:50:00	0,60	0,43	0,42	17,48	1,21	140,29	0,79	41,63	89,25
14:00:00	0,55	0,38	0,38	15,38	1,09	123,92	0,92	42,05	88,39
14:10:00	0,65	0,44	0,43	18,34	1,23	143,6	0,82	41,49	88,83
14:20:00	0,49	0,35	0,34	14,32	1	114,51	0,66	40,83	90,32
14:30:00	0,69	0,48	0,47	17,83	1,27	147,72	0,91	41,37	89,66
14:40:00	0,56	0,37	0,37	15,7	1,06	121,65	1,24	42,01	88,59
14:50:00	0,58	0,43	0,42	16,8	1,17	137,42	0,73	41,26	89,85
15:00:00	0,62	0,41	0,40	16,34	1,17	128,81	1,01	42,09	88,31
15:10:00	0,60	0,42	0,42	16,58	1,16	134,44	0,88	41,73	89,86
15:20:00	0,55	0,40	0,39	16,52	1,11	131,44	0,82	41,27	89,54
15:30:00	0,61	0,41	0,41	17,52	1,22	136,94	0,97	41,89	88,52
15:40:00	0,54	0,40	0,39	15,13	1,05	126,03	0,66	40,97	90,47
15:50:00	0,58	0,43	0,42	15,85	1,16	131,94	0,66	41,31	89,69
16:00:00	0,50	0,36	0,36	14,75	1,03	118,76	0,79	42,21	88,01
16:10:00	0,56	0,40	0,39	14,56	1,07	121,41	0,74	42,13	88,73
16:20:00	0,57	0,39	0,38	15,77	1,1	123,88	0,94	41,83	88,65
16:30:00	0,60	0,42	0,41	17,57	1,2	137,43	0,89	42,10	88,20
16:40:00	0,56	0,39	0,39	15,03	1,08	122,69	0,76	41,45	89,25
16:50:00	0,57	0,43	0,42	16,27	1,17	135,21	0,74	41,46	90,02
17:00:00	0,50	0,35	0,34	13,57	0,95	110,62	0,81	41,97	88,56
17:10:00	0,67	0,46	0,46	19,42	1,34	151,62	0,85	42,54	87,56
17:20:00	0,63	0,45	0,45	17,61	1,26	143,38	0,80	41,59	89,41
17:30:00	0,71	0,46	0,45	18,47	1,29	144,65	1,20	43,41	86,22
17:40:00	0,53	0,37	0,36	16,68	1,12	127,54	0,86	42,34	87,58
17:50:00	0,64	0,45	0,44	17,81	1,27	142,99	0,95	42,12	88,77
18:00:00	0,56	0,39	0,39	16,08	1,12	126,53	0,82	42,65	86,97
18:10:00	0,56	0,41	0,41	15,67	1,11	129,95	0,71	41,19	90,30
18:20:00	0,65	0,45	0,44	18,86	1,31	146,66	0,87	42,68	87,16
18:30:00	0,59	0,40	0,39	17,35	1,17	133,1	0,97	42,92	86,14
18:40:00	0,57	0,39	0,38	15,45	1,09	123,08	0,95	41,69	89,13
18:50:00	0,61	0,43	0,43	16,85	1,19	138,14	0,73	41,28	89,81
19:00:00	0,66	0,48	0,47	18,68	1,31	151,28	0,71	41,31	89,69
19:10:00	0,60	0,44	0,43	17,22	1,22	141,19	0,67	41,32	89,72
19:20:00	0,64	0,47	0,47	19,1	1,32	153,82	0,78	41,21	90,09
19:30:00	0,73	0,50	0,50	19,85	1,4	159,85	0,93	41,74	89,10
19:40:00	0,66	0,45	0,45	18,01	1,26	145,58	0,90	41,50	89,16
19:50:00	0,67	0,48	0,47	19,33	1,36	154,82	0,83	41,78	88,57
20:00:00	0,55	0,39	0,38	16,21	1,13	127,76	0,83	42,16	88,01
20:10:00	0,58	0,42	0,41	16,47	1,14	133,53	0,81	42,00	88,81
20:20:00	0,58	0,42	0,42	15,95	1,16	132,56	0,74	41,12	90,04
20:30:00	0,58	0,41	0,40	15,34	1,07	126,09	0,82	40,55	91,40
20:40:00	0,57	0,39	0,38	15,7	1,09	125,08	1,10	41,78	88,62
20:50:00	0,60	0,41	0,40	16,76	1,17	132,75	0,91	41,42	89,31
21:00:00	0,66	0,47	0,46	19,44	1,34	153	0,86	42,23	87,70
21:10:00	0,44	0,31	0,31	13,02	0,88	103,81	0,93	41,61	89,87
21:20:00	0,35	0,24	0,23	10,46	0,7	79,62	0,99	42,42	87,28
21:30:00	0,45	0,32	0,31	12,57	0,89	101,45	0,82	41,98	88,50
21:40:00	0,33	0,24	0,24	10,12	0,69	81,35	0,61	40,74	90,62
21:50:00	0,32	0,24	0,24	10,03	0,67	80,19	0,60	40,00	92,51
22:00:00	0,37	0,26	0,26	11,53	0,79	89,92	0,72	41,90	88,30
22:10:00	0,37	0,25	0,25	10,13	0,69	80,44	0,76	41,36	89,11
22:20:00	0,40	0,27	0,26	10,45	0,74	83,09	1,11	42,35	88,28



	Emisión CO total	Emisión HO total	Emisión NOx total	Consumo combustible	Densidad	Distancia total	tiempo demora	tiempo viaje	Velocidad
22:30:00	0,38	0,26	0,25	10,56	0,72	83,03	0,90	41,43	89,30
22:40:00	0,40	0,27	0,27	11,11	0,75	88,37	1,01	41,73	88,86
22:50:00	0,43	0,29	0,29	12,06	0,85	95,15	0,79	41,95	88,57
23:00:00	0,40	0,28	0,28	10,62	0,74	87,51	0,78	41,34	89,67
23:10:00	0,14	0,10	0,10	3,73	0,27	31	1,01	42,37	88,80
23:20:00	0,10	0,08	0,08	3,32	0,23	26,86	0,55	40,48	91,42
23:30:00	0,12	0,11	0,11	3,58	0,27	32,36	0,13	39,83	92,86
23:40:00	0,17	0,10	0,09	4,44	0,29	32,74	1,27	43,59	84,90
23:50:00	0,13	0,10	0,10	3,01	0,23	27,33	0,68	39,61	94,15
0:00:00	0,16	0,11	0,11	4,07	0,29	33,76	0,74	41,38	89,98
0:10:00	0,14	0,10	0,10	3,93	0,28	32,19	0,72	42,69	88,10
0:20:00	0,12	0,09	0,09	3,3	0,23	28,07	0,60	39,57	93,89
0:30:00	0,11	0,08	0,08	2,94	0,21	24,52	0,57	39,18	94,00
0:40:00	0,13	0,09	0,09	4,06	0,27	31,05	0,63	41,28	89,03
0:50:00	0,17	0,11	0,11	5,14	0,33	39,28	0,64	41,45	88,78
1:00:00	0,13	0,10	0,09	3,51	0,26	29,36	0,56	41,58	89,56
<b>Total</b>	<b>57,1</b>	<b>40,0</b>	<b>39,5</b>	<b>1601,44</b>	<b>0,78</b>	<b>12865,35</b>	<b>0,85</b>	<b>41,75</b>	<b>88,98</b>
<b>Media horaria</b>	<b>0,4</b>	<b>0,28</b>	<b>0,27</b>	<b>11,12</b>	<b>0,78</b>	<b>89,34</b>	<b>0,82</b>	<b>41,75</b>	<b>88,98</b>



# **Comparación de los resultados de la simulación utilizando diferentes semillas**





	CO Semilla 1	CO Semilla 2	CO Semilla 3	Consumo comb. Semilla 1	Consumo comb. Semilla 2	Consumo comb. Semilla 3	Distancia total Semilla 1	Distancia total Semilla 2	Distancia total Semilla 3
1:10:00	0.05	0.06	0.06	1.44	1.62	1.59	11.58	13.4	12
1:20:00	0.05	0.05	0.05	1.22	1.14	1.11	8.23	9.23	9.4
1:30:00	0.03	0.04	0.02	0.85	0.83	1.08	7.1	6.75	9.6
1:40:00	0.04	0.05	0.04	1.31	1.34	1.34	10.78	12.1	12.4
1:50:00	0.04	0.05	0.03	1.02	1.19	1.02	8.86	8.31	8.43
2:00:00	0.04	0.03	0.03	1.38	1.52	1.21	10.43	11	12.1
2:10:00	0.05	0.06	0.05	1.44	1.46	1.29	12.74	13.3	15.6
2:20:00	0.05	0.04	0.05	1.78	1.88	2.02	14.78	16.5	14.6
2:30:00	0.07	0.06	0.07	1.82	1.81	1.67	14.03	15.4	16.4
2:40:00	0.08	0.07	0.07	1.85	1.96	2.1	15.01	15	14.5
2:50:00	0.07	0.06	0.08	2.08	2.25	2.18	16.58	16.1	16.4
3:00:00	0.06	0.07	0.06	1.5	1.44	1.61	12.59	12.4	12.9
3:10:00	0.05	0.04	0.05	1.74	1.64	1.67	13.95	14	13.7
3:20:00	0.04	0.03	0.05	1.34	1.45	1.52	10.11	10.5	11.2
3:30:00	0.02	0.02	0.03	0.86	0.86	0.79	5.94	7.46	6.52
3:40:00	0.06	0.05	0.06	1.64	1.71	2.02	13.16	14.5	11.7
3:50:00	0.02	0.02	0.01	1.06	1.18	0.89	8.33	8.26	7.71
4:00:00	0.02	0.02	0.02	0.42	0.54	0.28	3.88	3.99	4.61
4:10:00	0.03	0.02	0.03	0.89	1.03	0.73	7.22	7.79	6.31
4:20:00	0.04	0.04	0.04	1.24	1.39	1.33	9.46	8.7	7.66
4:30:00	0.06	0.06	0.05	1.85	1.89	2.1	13.7	15.1	16.3
4:40:00	0.04	0.05	0.05	1.34	1.51	1.14	10.6	12.2	11.6
4:50:00	0.05	0.04	0.06	1.44	1.44	1.57	12.09	12.6	12.4
5:00:00	0.02	0.03	0.03	0.97	1.06	0.77	6.89	6.09	7.37
5:10:00	0.15	0.16	0.15	4.32	4.25	4.33	33.48	34.1	32
5:20:00	0.16	0.16	0.16	4.43	4.48	4.62	37.06	37.4	39.9
5:30:00	0.14	0.14	0.13	3.46	3.61	3.27	28.1	27.1	27
5:40:00	0.12	0.13	0.13	3.61	3.53	3.76	28.61	29	30.2
5:50:00	0.14	0.13	0.15	3.82	3.75	3.98	30.42	31.6	32.7
6:00:00	0.13	0.14	0.12	3.7	3.68	3.92	31.85	33.6	33.2
6:10:00	0.13	0.12	0.14	3.74	3.81	4.04	30.18	29.4	32.6
6:20:00	0.15	0.16	0.16	3.74	3.68	3.72	30.4	30.9	31.1
6:30:00	0.15	0.15	0.16	4.08	4.15	4.09	31.44	31.3	32.7
6:40:00	0.14	0.15	0.13	3.59	3.57	3.71	29.76	29.6	28.4
6:50:00	0.13	0.14	0.12	4.04	4.04	4.12	31.55	33.2	32.5
7:00:00	0.11	0.11	0.12	2.48	2.63	2.8	22.81	23.6	21.4
7:10:00	0.46	0.45	0.47	11.91	11.8	12.1	100.78	100	100
7:20:00	0.48	0.48	0.47	11.62	11.7	11.7	100.28	101	102
7:30:00	0.57	0.58	0.58	14.98	14.8	14.9	122.67	122	122
7:40:00	0.51	0.5	0.51	13.78	13.7	13.6	115.43	117	114
7:50:00	0.57	0.57	0.56	14.7	14.7	14.8	116.04	117	118
8:00:00	0.43	0.44	0.42	12.13	12.1	12.1	99.82	98.8	98.7
8:10:00	0.47	0.47	0.47	12.71	12.6	12.5	107.02	108	109
8:20:00	0.46	0.45	0.47	13.25	13.4	13.4	104.22	103	106
8:30:00	0.44	0.43	0.43	12.68	12.8	12.8	97.34	98.6	97.3
8:40:00	0.44	0.43	0.44	12.72	12.7	13	99.37	101	98.5
8:50:00	0.45	0.46	0.44	12.72	12.8	12.7	103.51	102	103
9:00:00	0.5	0.51	0.5	13.59	13.6	13.5	111.4	112	111
9:10:00	0.66	0.67	0.67	18.31	18.4	18.5	148.82	150	147
9:20:00	0.61	0.61	0.62	17.88	17.8	17.7	139.16	139	137
9:30:00	0.56	0.55	0.57	15.97	16	16.2	126.93	126	128
9:40:00	0.54	0.54	0.54	14.85	14.9	14.6	122.43	124	123
9:50:00	0.59	0.58	0.59	17.23	17.3	17.6	134.35	136	133
10:00:00	0.46	0.45	0.45	13.67	13.8	13.5	110.15	109	109
10:10:00	0.63	0.63	0.63	16.53	16.6	16.8	133.8	134	132
10:20:00	0.59	0.58	0.58	16.95	16.8	16.9	131.52	132	130
10:30:00	0.6	0.59	0.61	16.85	16.9	17	136.19	135	138
10:40:00	0.64	0.65	0.64	18.34	18.3	18.6	146.02	147	146
10:50:00	0.6	0.61	0.59	16.92	16.8	17.2	136.54	136	137
11:00:00	0.62	0.62	0.62	17.19	17.2	16.9	137.32	137	139
11:10:00	0.55	0.56	0.56	14.08	14	13.9	117.53	117	119
11:20:00	0.59	0.59	0.59	15.51	15.5	15.6	126.36	126	129
11:30:00	0.53	0.53	0.54	15.84	15.7	16	124.41	125	126





	CO Semilla 1	CO Semilla 2	CO Semilla 3	Consumo comb. Semilla 1	Consumo comb. Semilla 2	Consumo comb. Semilla 3	Distancia total Semilla 1	Distancia total Semilla 2	Distancia total Semilla 3
11:40:00	0.59	0.6	0.6	15.46	15.4	15.4	125.15	124	123
11:50:00	0.63	0.62	0.64	17.56	17.7	17.6	139.76	141	142
12:00:00	0.54	0.55	0.53	15.25	15.4	15.6	123.67	122	122
12:10:00	0.54	0.53	0.55	14.82	14.7	14.6	122.2	123	122
12:20:00	0.57	0.57	0.58	15.95	16	15.8	127.98	129	128
12:30:00	0.58	0.57	0.59	16.1	16	16.3	129.18	128	128
12:40:00	0.48	0.48	0.47	13.86	13.8	13.9	114.73	116	116
12:50:00	0.55	0.54	0.54	15.23	15.3	15	123.09	124	126
13:00:00	0.52	0.51	0.51	15.46	15.4	15.5	119.77	120	122
13:10:00	0.52	0.52	0.52	14.51	14.4	14.8	115.91	116	117
13:20:00	0.58	0.57	0.58	15.45	15.5	15.7	123.14	123	122
13:30:00	0.65	0.66	0.65	17.19	17.1	17.5	135.99	136	136
13:40:00	0.6	0.61	0.61	16.86	16.8	17	135.56	135	134
13:50:00	0.6	0.6	0.59	17.48	17.4	17.3	140.29	139	141
14:00:00	0.55	0.56	0.54	15.38	15.3	15.5	123.92	123	124
14:10:00	0.65	0.64	0.65	18.34	18.5	18.2	143.6	143	144
14:20:00	0.49	0.48	0.5	14.32	14.5	14.1	114.51	114	112
14:30:00	0.69	0.69	0.69	17.83	17.9	17.6	147.72	148	149
14:40:00	0.56	0.55	0.56	15.7	15.7	15.7	121.65	122	123
14:50:00	0.58	0.58	0.59	16.8	16.8	17.1	137.42	136	139
15:00:00	0.62	0.62	0.62	16.34	16.2	16.2	128.81	129	127
15:10:00	0.6	0.59	0.59	16.58	16.7	16.5	134.44	135	134
15:20:00	0.55	0.55	0.56	16.52	16.6	16.9	131.44	131	131
15:30:00	0.61	0.61	0.6	17.52	17.6	17.6	136.94	136	136
15:40:00	0.54	0.53	0.54	15.13	15.1	15.3	126.03	127	126
15:50:00	0.58	0.57	0.59	15.85	15.9	16	131.94	132	131
16:00:00	0.5	0.49	0.51	14.75	14.7	14.7	118.76	120	118
16:10:00	0.56	0.57	0.55	14.56	14.6	14.7	121.41	122	121
16:20:00	0.57	0.56	0.57	15.77	15.8	16	123.88	125	122
16:30:00	0.6	0.61	0.61	17.57	17.6	17.7	137.43	139	136
16:40:00	0.56	0.55	0.56	15.03	15	15.3	122.69	122	122
16:50:00	0.57	0.56	0.58	16.27	16.1	16.5	135.21	134	136
17:00:00	0.5	0.49	0.5	13.57	13.7	13.7	110.62	109	111
17:10:00	0.67	0.66	0.67	19.42	19.5	19.2	151.62	153	154
17:20:00	0.63	0.62	0.62	17.61	17.7	17.7	143.38	144	145
17:30:00	0.71	0.7	0.72	18.47	18.6	18.4	144.65	146	144
17:40:00	0.53	0.54	0.53	16.68	16.7	17	127.54	128	127
17:50:00	0.64	0.65	0.63	17.81	17.8	17.7	142.99	144	145
18:00:00	0.56	0.56	0.55	16.08	16	16	126.53	127	125
18:10:00	0.56	0.56	0.56	15.67	15.5	15.9	129.95	131	128
18:20:00	0.65	0.65	0.65	18.86	18.7	19.2	146.66	147	148
18:30:00	0.59	0.6	0.58	17.35	17.2	17.6	133.1	132	132
18:40:00	0.57	0.56	0.56	15.45	15.5	15.2	123.08	124	123
18:50:00	0.61	0.61	0.61	16.85	17	17.1	138.14	137	137
19:00:00	0.66	0.66	0.66	18.68	18.6	18.5	151.28	150	153
19:10:00	0.6	0.61	0.61	17.22	17.4	17.2	141.19	142	139
19:20:00	0.64	0.64	0.64	19.1	19.1	19.3	153.82	154	153
19:30:00	0.73	0.72	0.74	19.85	19.9	19.7	159.85	161	158
19:40:00	0.66	0.67	0.66	18.01	17.9	18	145.58	144	144
19:50:00	0.67	0.67	0.67	19.33	19.2	19.2	154.82	154	153
20:00:00	0.55	0.55	0.55	16.21	16.4	16.1	127.76	127	128
20:10:00	0.58	0.58	0.57	16.47	16.5	16.8	133.53	134	134
20:20:00	0.58	0.57	0.57	15.95	15.9	15.7	132.56	133	132
20:30:00	0.58	0.57	0.58	15.34	15.4	15.4	126.09	125	124
20:40:00	0.57	0.57	0.56	15.7	15.6	15.6	125.08	124	126
20:50:00	0.6	0.61	0.6	16.76	16.8	16.9	132.75	133	135
21:00:00	0.66	0.67	0.65	19.44	19.3	19.3	153	154	152
21:10:00	0.44	0.45	0.43	13.02	13	12.9	103.81	103	103
21:20:00	0.35	0.34	0.34	10.46	10.5	10.3	79.62	80.8	79.9
21:30:00	0.45	0.45	0.46	12.57	12.6	12.6	101.45	101	102
21:40:00	0.33	0.33	0.34	10.12	10	9.99	81.35	82.2	83.6
21:50:00	0.32	0.31	0.32	10.03	10.1	10.1	80.19	81.7	81
22:00:00	0.37	0.36	0.38	11.53	11.6	11.7	89.92	89.3	88



	CO Semilla 1	CO Semilla 2	CO Semilla 3	Consumo comb. Semilla 1	Consumo comb. Semilla 2	Consumo comb. Semilla 3	Distancia total Semilla 1	Distancia total Semilla 2	Distancia total Semilla 3
22:10:00	0.37	0.37	0.36	10.13	10	9.96	80.44	81.7	82.2
22:20:00	0.4	0.41	0.4	10.45	10.5	10.8	83.09	83.5	85
22:30:00	0.38	0.37	0.37	10.56	10.6	10.4	83.03	82.8	84.7
22:40:00	0.4	0.4	0.41	11.11	11.2	11.4	88.37	89.7	87
22:50:00	0.43	0.42	0.43	12.06	12	11.8	95.15	94.2	93.5
23:00:00	0.4	0.4	0.4	10.62	10.5	10.9	87.51	86.7	85.9
23:10:00	0.14	0.15	0.13	3.73	3.79	4.06	31	31.5	29.4
23:20:00	0.1	0.09	0.11	3.32	3.34	3.54	26.86	26.5	26.5
23:30:00	0.12	0.13	0.12	3.58	3.69	3.52	32.36	34	32.7
23:40:00	0.17	0.16	0.18	4.44	4.36	4.52	32.74	32.1	34
23:50:00	0.13	0.13	0.13	3.01	3.13	3.19	27.33	27.2	26.8
0:00:00	0.16	0.15	0.17	4.07	4.24	4.21	33.76	32.9	33.8
0:10:00	0.14	0.14	0.15	3.93	4.02	4.25	32.19	31.6	33.8
0:20:00	0.12	0.12	0.11	3.3	3.49	3.33	28.07	27.8	27.8
0:30:00	0.11	0.12	0.1	2.94	2.97	3.15	24.52	26.3	26.6
0:40:00	0.13	0.14	0.14	4.06	4.22	4.01	31.05	30.9	31.4
0:50:00	0.17	0.17	0.16	5.14	5.26	5.25	39.28	38.4	42
1:00:00	0.13	0.14	0.14	3.51	3.68	3.82	29.36	29.9	30.9



Estudio de la viabilidad de la automatización del transporte de mercancías en carretera en calzada única